Syrian Arab Republic
Minestry of High Education
Al-Baath University
Department of Mechanical Power Engineering
Factulity of Mechanical and Electrical Engineering

Thesis submitted for .M.Sc.Degree
In Mechanical Power Engineering

Development of Wind Rotor Depends on Savonious\Darrieus principle

By
Eng. Hani Afif Mitree

Supervised by
Prof.Eng.Naif Al-abboud

2009-2010

لقد تمّ تصحيح الأخطاء الموجودة في نص الرسالة, كما تم إجراء التعديلات المطلوبة وفق ملاحظات السادة الدكاترة أعضاء لجنة الحكم في جلسة الدفاع بتاريخ 2010/1/13.

السادة أعضاء لجنة الحكم:

الأستاذ الدكتور المهندس: نايف العبود	مشرفاً
الدكتور المهندس: نبيل كشكية	عضواً
الدكتور المهندس: محمد بشار معيني	عضواً

كلمة شكر

بعد ثلاث سنوات من العمل والدأب المتواصل، تم بمعونة الله إنهاء هذا البحث آملاً أن أكون قد أضفت لمكتبتنا العربية عملاً مفيداً راجياً منه المنفعة لكل طالب وباحث. ولا يسعني في النهاية إلا أن أتقدم بخالص الشكر والامتنان لأستاذي القدير المشرف على هذا البحث:

الأستاذ الدكتور المهندس نايف العبود

لما قدمه لي من علم ومعرفة وتوجيه وخبرة كافية ووافية لإنجاز هذا العمل البحثي.

كما أتقدم بكل الشكر والاحترام لأعضاء الهيئة التدريسية في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة البعث.

وأتقدم أيضاً بكامل التقدير والاحترام لكافة العاملين في **وزارة الكهرباء**
وأخص بالذكر زملائي في **الشركة العامة لكهرباء محافظة حمص.**
مع خالص المحبة والتقدير لزملائي وأصدقائي في دائرة **حفظ الطاقة**

ملخص البحث

عنوان البحث: تطوير دوار ريحي يعمل بمبدأ سافونيوس/داريوس.

نظراً لتزايدِ الطلب العالمي والمحلي على الطاقة وما شهدهُ العالم في السنوات الأخيرة من ازديادٍ كبيرٍ بأسعار الوقودِ الاحفوري, إضافةً لما تلعبهُ الطاقةُ من دورٍ رئيس في مختلف فعاليات الحياة وما يسببهُ استخدام الوقود الاحفوري من تلوثٍ كبير للبيئة عند حرقهِ للحصولِ على الطاقة خاصةً في المحطاتِ التقليدية لتوليد الطاقة الكهربائية, لذا كان لا بدَّ من التوجهِ نحو أبحاثٍ تُعنى بدراسة تطبيقات الطاقات الجديدة والمتجددة النظيفة بيئياً كالطاقةِ الشمسية وطاقةِ الرياح.
تعتبرُ طاقة الرياح بالنسبة للجمهورية العربية السورية واحدةً من أهم أشكال الطاقات البديلة التي يمكن استغلالها لما تمتاز به مناطقها من كمونٍ ريحيٍّ كبير وتعدُّ محافظة حِمص واحدةً من أكثرِ المناطق السورية غنى بالكمون الريحي مما يستوجب التفكير باستثمار طاقةِ الرياح كمصدرٍ بديل للطاقة في سورية خاصةً بعد أن أصبحت المزارع الريحية تنافس المحطات التقليدية لتوليد الطاقة الكهربائية في كلفة واحدة الطاقة المُنتجة.

بناءً على ذلك تمَّ التوجه في هذا البحث لدراسة وتصنيع واختبار دوار ريحي مطوَّر ذي محور دوران شاقولي يعمل بمبدأ (سافونيوس/داريوس).
يدور دوار داريوس بفعل قوة الرفع الآيروديناميكية المؤثرة على ريشاته ذات المقاطع الانسيابية التي تجعله يدور بسرعات دوران كبيرة تناسب عمل المولدات الكهربائية, إلاّ أنّ هذا الدوار يتصف من ناحيةٍ أخرى بعزم إقلاع ضعيف عند قيمٍ صغيرةٍ لسرعاتِ الرياح.

لذا تمّ التركيز في هذا البحث على تحسين عزم إقلاع دوار داريوس عند سرعات رياح بطيئة من خلال ربطه ميكانيكياً مع دوار سافونيوس ذي محور الدوران الشاقولي أيضاً والذي يعمل بقوة دفع الرياح التي تمنحه عزم إقلاع كبير.

يتصف هذين الدوارين ببساطة التصميم وسهولة التصنيع بتكلفةٍ ماديةٍ قليلةٍ نسبياً مما يجعلهما مناسبين لتوليد الطاقة الكهربائية خاصة في المناطق المعزولة عن الشبكة العامة من أراضي الجمهورية العربية السورية.

تمَّ أيضاً في سياق هذا البحث إجراء نمذجة حاسوبية لدراسةِ أداء كل من دوار داريوس ودوار سافونيوس بالاعتماد على برنامج MATLAB7. نفذّت هذه النمذجة لتكون أداةً للتوجيه تساعد في أثناء التصميم على اختيار المعالم الأساسية لنموذج دوار سافونيوس/داريوس موضوع البحث.

تمَّ اختبار عدة نماذج من الدوار المُصنّع لدراسة تأثير عدد الريشات وأبعاد دوار سافونيوس على عمل دوار سافونيوس/داريوس وهو بحالة اللاحمل منذ إقلاعه وحتى استقراره وذلك من خلال قياس تغيّر سرعة دوران محور الدوار مع الزمن عند سرعاتٍ مختلفةٍ لتيارِ الهواء وتمّت في النهاية مناقشة نتائج الاختبارات العملية وتقييم مدى فعالية عملية الربط الميكانيكي بين الدوارين وتحديد النموذج الأفضل من بين النماذج المُختبرة.

الفهرس

قائمة بالرموز المستخدمة في النص

المقدار الفيزيائي	الرمز	الرمز المستخدم في النمذجة الحاسوبية	الواحدة
مساحة مقطع دوار داريوس المواجه للرياح	A	—	m^2
مساحة نصف اسطوانة دوار سافونيوس المواجهة للرياح	A_s	—	m^2
معامل التحريض	a	a	/
طول وتر المقطع الانسيابي	c	C	m
معامل الاحتكاك للمقطع الانسيابي	C_d	CD	/
معامل الدفع لدوار سافونيوس	C_{Ds}	cd	/
معامل الرفع للمقطع الانسيابي	C_l	CL	/
معامل القوة الناظمية للريشة	C_{norm}	CN	/
معامل استطاعة دوار داريوس	C_p	Cp	/
معامل استطاعة دوار سافونيوس	C_{p_s}	cp	/
معامل عزم دوار داريوس	C_t	Ct	/
معامل القوة المماسية للريشة	C_{tang}	CT	/
معامل الدفع	C_{thrust}	thrustcofficient	/
قطر دوار داريوس	D	D	m
قوة الدفع المؤثرة على نصف اسطوانة دوار سافونيوس	F_{D_s}	—	N
ارتفاع العائق	H		m
ارتفاع دوار داريوس	h	—	m
ارتفاع دوار سافونيوس	h_s	—	m

m	–	h_o	ارتفاع الطبقة الحدية لجريان الرياح فوق سطح الأرض
/	–	K_e	معامل نموذج طاقة الرياح
m	–	L	ارتفاع سفح التل
m	–	l	ارتفاع مركز الدوار فوق سفح التل
kg	–	m	كتلة الهواء المارة عبر مقطع
kg/sec	–	$\dot{m}$	التدفق الكتلي
/	tubenumber	m_t	عدد المجاري
/	N	n	عدد الريشات
/	–	n_h	عدد الساعات في السنة
W	–	P	استطاعة دوار داريوس
Pa	–	P_{down}	الضغط بعد دوار داريوس
Pa	–	P_{in}	الضغط قبيل دوار داريوس
W	–	P_s	الاستطاعة المولدة من دوار سافونيوس
Pa	–	P_{up}	الضغط قبل دوار داريوس
W	–	P_{wind}	استطاعة الرياح
Pa	–	P_1	الضغط عند مقطع رقم(1) من جريان ما
Pa	–	P_2	الضغط عند مقطع رقم(2) من جريان ما

W/m^2	_	P_{wind}/A	الاستطاعة النوعية للرياح
		$\bar{P}/A$	المتوسط السنوي للاستطاعة النوعية للرياح
m.N	—	Q	العزم اللحظي المتولد من مرور الريشة ضمن المجرى
m.N	—	Q_{av}	العزم الوسطي المتولد من دوار داريوس خلال دورة كاملة
m.N	—	Q_{axis}	العزم المتولد على محور دوار داريوس
m.N	—	Q_{wind}	عزم تيار الهواء الحر
m	—	R	نصف قطر دوار داريوس
/	Re	Re	رقم رينولدز
m	—	R_s	نصف قطر دوار سافونيوس
m	—	r_s	بعد مركز نصف اسطوانة دوار سافونيوس عن مركز الدوران
m	—	s	البعد الداخلي لنهايتي نصفي الاسطوانة المشكلتين لدوار سافونيوس (مسافة التداخل)
N	—	T	قوة الدفع اللحظية المؤثرة على المقطع الانسيابي

N	—	T_{av}	متوسط قوة الدفع المؤثرة على الريشات عند مرورها بمجرى معين
—	tsrs	tsr	نسبة السرعة المحيطية لدوار داريوس
m/sec	—	V	سرعة تيار الرياح
m/sec		V_{av}	المتوسط السنوي لسرعة الرياح
m/sec	—	V_i	متوسط سرعة الرياح خلال ساعة
m/sec	—	V_R	السرعة النسبية عند مقدمة المقطع الانسيابي
—	VR	$\frac{V_R}{V}$	نسبة السرعة النسبية إلى سرعة التيار الحر
m/sec	—	V_{rs}	السرعة النسبية لدوار سافونيوس
m/sec	—	$V_{(z)}$	السرعة عند الارتفاع z
m/sec	—	$V_{(zr)}$	السرعة عند الارتفاع المرجعي
m/sec	—	V'	سرعة الرياح قبيل دوار داريوس
m/sec	—	V''	سرعة الرياح بعد دوار داريوس
m/sec	—	V_1	سرعة التيار عند مقطع رقم(1) من جريان ما
m/sec	—	V_2	سرعة التيار عند مقطع رقم (2) من جريان ما
m	—	x	مسافة أفقية
m	—	z_0	معامل الخشونة
m	—	z	الارتفاع عن سطح الأرض

m	–	z_r	الارتفاع المرجعي
rad	AoA	α	زاوية الهجوم
–	tsr	λ_s	نسبة السرعة المحيطية لدوار سافونيوس
rad	angularposition	θ	الوضعية الزاوية للريشة في مستوي الدوران
kg/m³	–	ρ	الكتلة الحجمية للهواء
rad/sec	–	ω	السرعة الزاوية للدوار
J	–	ΔE	التغير في الطاقة الحركية للرياح
kg.m /sec	–	ΔM	الفقد في كمية الحركة
W	–	ΔP	التغير بالاستطاعة الحركية للرياح
rad	angularstep	$\Delta \theta$	زاوية القطاع الزاوي المقابل للمجرى الواحد

قائمة بالأشكال الواردة في النص

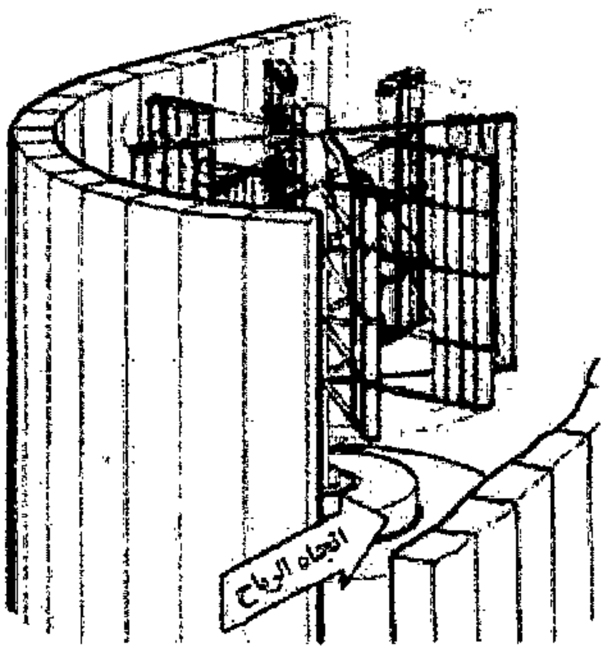
قائمة بالجداول الواردة في النص

الفصل الأول

مدخل في طاقة الرياح

1-1 مقدمة:

بدأت قصة الإنسان مع طاقة الرياح منذ أكثر من أربعة آلاف سنة حيث استفاد المصريون القدماء من طاقة الرياح لدفع مراكبهم الشراعية حينذاك. كما تمكن الفرس من توظيف طاقة الرياح للحصول على حركة دورانية لمحاور شاقولية استخدمت لطحن الحبوب, الشكل(1-1).



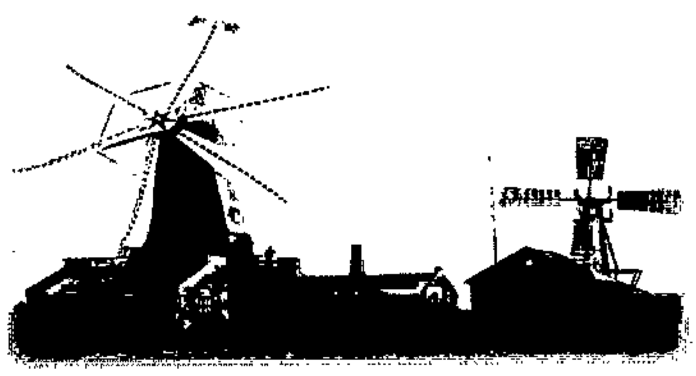
الشكل(1-1) دوار ريحي شاقولي استخدمه الفرس لطحن الحبوب

أما في العصور الوسطى فقد انتشرت في أوروبا طواحين الهواء الكلاسيكية بشكل واسع, الشكل(1-2), وشكلت المصدر الأساسي للقوى المحركة في مجالات صناعية متعددة آنذاك وبلغ عدد الطواحين المركبة حينذاك 200000 طاحونة هواء متمركزة بشكل أساسي في غرب أوروبا, إلا أن اختراع المحرك البخاري الذي يعمل بالفحم الحجري وقف حاجزاً أمام انتشار هذه الطواحين.

كما كان لأبناء القارة الأمريكية لمساتهم في مطلع القرن التاسع عشر من خلال المراوح ذات محور الدوران الأفقي متعددة الريشات التي تدور بفعل قوى دفع

الرياح لريشاتها, قارن الشكل(2-2-ب). لقد انطلقت هذه المراوح من مناطق جنوب الولايات المتحدة الأمريكية والمكسيك واستخدمت لأغراض ضخ المياه وانتشرت بشكل واسع حتى وصلت هذه الصناعة إلى الجمهورية العربية السورية عن طريق السوريين المقيمين في المهجر وما يزال بعض من هذه المراوح موجوداً في منطقة النبك ودير عطية في محافظة ريف دمشق وفي بلدة فيروزة ومنطقة مهين في محافظة حمص إضافة إلى مناطق أخرى عديدة من الأراضي السوريّة.

إلا أن اكتشاف النفط في أواسط القرن الماضي واعتبار مشتقاته مصدراً أساسياً ليس له منافس في توليد الطاقة الكهربائية وتشغيل محركات الاحتراق الداخلي لما تمتاز به هذه المشتقات النفطية من طاقة حرارية كامنة كبيرة تمكنها من تلبية الحاجات الناجمة عن التزايد المتسارع لعدد سكان العالم وزيادة الاستهلاك والتطور الهائل للمكننة, أدى إلى جعل اهتمام مراكز البحوث والجامعات ينصرف عن التفكير بالطاقات البديلة معتقدين أن النفط هو مصدر الطاقة الدائم والكافي للبشرية جمعاء, فاقتصرت أبحاث الطاقات البديلة على بعض المهتمين والهواة من الباحثين. ثم استمر هذا الحال حتى ظهرت أزمة النفط في مطلع سبعينيات القرن الماضي حينها أدرك العالم مدى حاجته الملّحة لاستخدام الطاقات البديلة وخاصة طاقة الرياح كمصدر للطاقة وأصبح تطوير هذه التقنية من أولويات عمل الباحثين ومراكز البحوث, / 2, 3, 6 /.



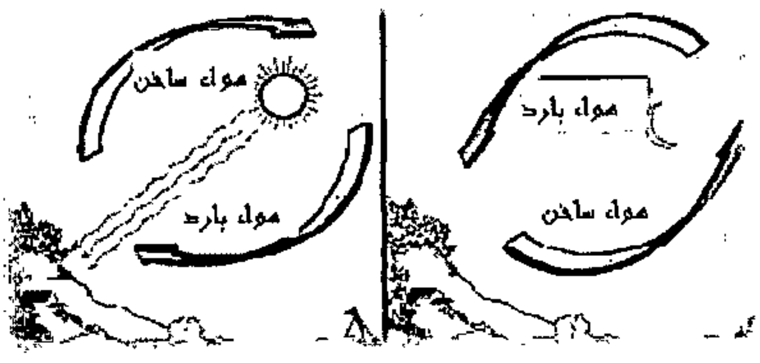
الشكل (1-2) الطواحين الهوائية الأوروبية الكلاسيكية

1-2- مصادر الرياح وقياساتها وأهم العوامل المؤثرة على استثمارها:

1-2-1- مصادر هبوب الرياح:

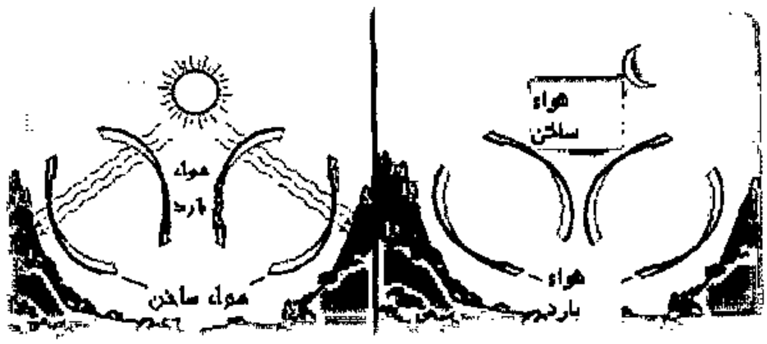
- تعتبر الرياح في حقيقة الأمر شكلاً من أشكال الطاقة الشمسية, حيث تشكل طاقة الرياح المتوفرة في الغلاف الجوي نسبة تراوح من (1.2%) إلى (2.5 %) من الطاقة الشمسية الحرارية الواصلة إلى سطح الأرض. فعند سقوط الإشعاع الشمسي بكميات متفاوتة على مناطق مختلفة من سطح الأرض يجعل بعض المناطق أشد حرارة من مناطق أخرى, فيصعد بذلك الهواء الدافئ إلى طبقات الجو العليا ليحل محله الهواء البارد الأكبر كثافة مما يسبب نشوء الرياح, حيث يعتبر تسخين الشمس للمناطق الاستوائية بشكل كبير بالمقارنة مع ضعف شدة الإشعاع الشمسي الواصل إلى القطبين هو فرق الكمون الحراري الأساسي المولد للرياح.

كما يوجد أيضا فروق كمون حرارية أخرى كالتي تنشأ عن فرق التسخين الشمسي بين اليابسة والماء عند شواطئ البحار والمحيطات هذا ما يجعل المناطق الساحلية متميزة بحركة الرياح فيها, كذلك الأمر بالنسبة للمناطق الجبلية المشهورة بتوفر الرياح فيها والناجمة عن فرق التسخين الشمسي للوديان والجبال فتهب رياح متفاوتة الشدة بين الليل والنهار على سفوح هذه الجبال. يظهر الشكل(1-3) حركة الرياح في أثناء الليل والنهار على شواطئ البحار والمحيطات ويبين الشكل(1-4) حركة الرياح في أثناء الليل والنهار في المناطق الجبلية, / 2, 3, 6 /.



-أثناء النهار- -أثناء الليل-

الشكل (1-3) نشوء الرياح في المناطق الساحلية



– أثناء الليل–   – أثناء النهار –

الشكل (1–4) نشوء الرياح في المناطق الجبلية

1–2–2– قياس سرعة الرياح:

إن أهم ما يعترض الباحثين ومصممي العنفات الريحية هو تغير الرياح بالسرعة والاتجاه بشكل لحظي وعلى مدار اليوم ومع تغير فصول السنة, كما أن طبيعة هبوب الرياح في منطقة معينة يمكن أن تتغير خلال عقود من الزمن, لذا يعتبر قياس سرعة الرياح لفترة من الزمن تراوح من عدة أشهر حتى عدة سنوات وتحديد الاتجاه السائد في منطقة القياس أمراً لا بد منه لأخذ المعلومات اللازمة لتصميم العنفات الريحية المناسبة وتحديد الجدوى الاقتصادية من إقامة مثل هذه المشاريع وتأتي هذه الأهمية كون استطاعة الرياح تتناسب مع مكعب السرعة حيث تعطى استطاعة الرياح المارة عبر مقطع معين بحسب / 1, 2, 6 / بالعلاقة(1–1) التي تعتبر أساس هندسة طاقة الرياح:

$$P_{wind} = \frac{1}{2}\,\rho A\, V^{3} \quad \text{...} (1-1)$$

حيث أن: A هي مساحة المقطع التي تعبر منه الرياح $[m^2]$.

ρ هي الكتلة الحجمية للهواء $[kg/m^3]$.

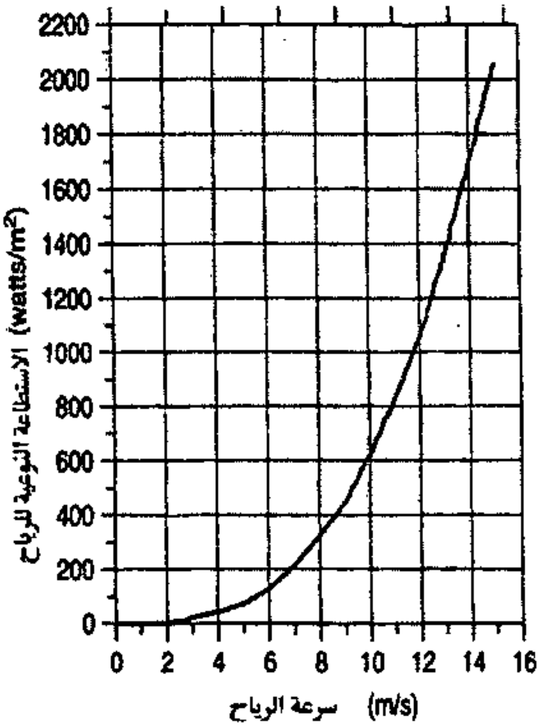
V هي سرعة تيار الرياح [m/sec].

P_{wind} هي استطاعة الرياح [w].

وتعرف الاستطاعة النوعية للرياح على أنها استطاعة التيار الريحي المتوفرة ضمن مقطع من الجريان مساحته($1m^2$) وتعطى بحسب المرجع/ 6 / بالعلاقة

التالية:

$$P_{wind}/A = \frac{1}{2}\rho V^{3} \qquad (2-1)$$



الشكل (1-5) علاقة الاستطاعة النوعية للرياح بسرعتها

عند إجراء القياسات اللازمة لتحديد المتوسط السنوي لسرعة الرياح في منطقة ما, يتم أخذ قيم سرعة الرياح لكل ثانية ويتم حساب المتوسط لكل عشر ثواني وبعدها يحسب وسطي سرعة الرياح خلال ساعة من الزمن ومن ثم يحسب متوسط سرعة الرياح السنوي بحسب / 6 / من خلال العلاقة التالية:

$$V_{av} = \frac{1}{n_h}\sum_{i=1}^{n_h} V_i \qquad (3-1)$$

حيث أن: V_{av} هو المتوسط السنوي لسرعة الرياح في المنطقة المدروسة [m/sec].

V_i هو متوسط سرعة الرياح خلال ساعة معينة [m/sec].

n_h هو عدد الساعات في السنة و قدره (8760) [/].

بعد معرفة المتوسط السنوي لسرعة الرياح يتم حساب المتوسط السنوي للاستطاعة النوعية للرياح (وهي مقدار المتوسط السنوي لاستطاعة الرياح المتوفرة ضمن مقطع مساحته $1m^2$) بحسب / 6 / من خلال التالية:

$$\bar{P}/A = \frac{1}{2}\rho V_{av}{}^{3} K_e \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4-1)$$

حيث أن: $\bar{P}/A$ هي المتوسط السنوي للاستطاعة النوعية للرياح $[W/m^2]$.

ρ هي الكتلة الحجمية للهواء $[kg/m^3]$.

K_e هو معامل نموذج طاقة الرياح [/].

يحسب معامل نموذج طاقة الرياح بحسب / 6 / من العلاقة التالية:

$$K_e = \frac{1}{n_h V_{av}{}^{3}} \sum_{i=1}^{n_h} V_i{}^{3} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(5-1)$$

يتم تصنيف غنى المناطق بالكمون الريحي بحسب قيمة المتوسط السنوي للاستطاعة النوعية للرياح المتوفرة وذلك حسب الجدول(1-1) التالي, / 6 /:

المتوسط السنوي للاستطاعة النوعية للرياح $[W/m^2]$	تصنيف غنى المنطقة بالكمون الريحي
أقل من 100	منطقة فقيرة
تساوي تقريبا 400	منطقة جيدة
أكبر من 700	منطقة ممتازة

الجدول(1-1) تصنيف غنى المناطق بالكمون الريحي

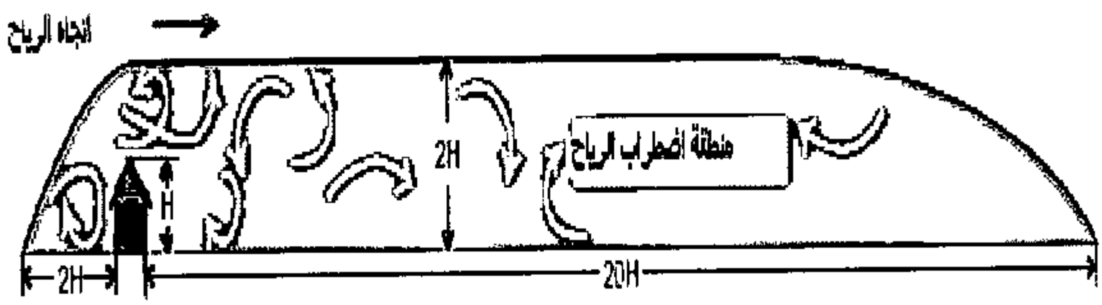
يتم تصنيف الرياح إلى عدة درجات من الشدة بحسب السرعة التي تهب فيها ويبدأ هذا التصنيف بحركة الهواء الخفيفة والنسيم انتقالاً إلى الرياح ثم العاصفة ويليها الإعصار. يظهر الجدول(1-2) هذا التصنيف مع تحديد الأثر المرافق لكل سرعة تهب فيها الرياح, / 24 /:

درجة شدة الرياح	سرعة الرياح [km/h]	سرعة الرياح [m/sec]	الدلالة أو التسمية	الأثر أو المشاهدة المرافقة
0	2	0.5	حركة خفيفة جداً	يتصاعد دخان السجائر عندها بشكل شاقولي
1	6	1.5	نسمة عليلة	يتصاعد دخان السجائر عندها بشكل مائل
2	11	3	نسمة قوية	يتم الشعور بتأثيرها على الوجه والشعر
3	19	5	رياح ضعيفة	يلاحظ عندها حركة أوراق الأشجار
4	25	7	رياح معتدلة	يلاحظ عندها حركة أغصان الأشجار
5	35	10	رياح نشيطة	يلاحظ عندها حركة فروع الأشجار
6	45	12.5	رياح قوية	تصدر صوت صفير
7	55	15	رياح قوية جداً	يلاحظ عندها حركة الأشجار
8	65	18	بداية العاصفة	تنحني ساق الأشجار
9	77	21	العاصفة	يلاحظ تكسر قرميد الأسقف
10	90	25	عاصفة قوية	تتحطم عندها الأشجار
11	105	29	بداية الإعصار	تحطم الأسقف الخشبية للمنازل
12	120	33	الإعصار	تحطم المنازل الخشبية

الجدول(1-2) درجات شدة هبوب الرياح

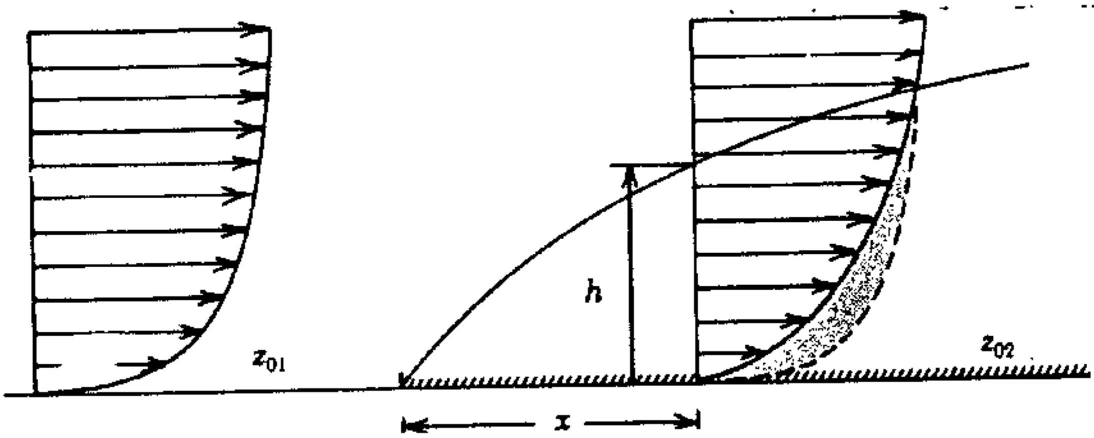
2-1-3- أهم العوامل المؤثرة على استثمار طاقة الرياح:

- عند دراسة منطقة معينة بغاية نصب العنفات الريحية فيها فأهم ما يجب مراعاته من قبل الدارسين المختصين هو طبيعة العوائق الموجودة في المنطقة من تلال ومباني وأشجار مرتفعة, حيث تتشكل خلف هذه العوائق منطقة اضطراب للرياح تؤثر على أداء العنفة إن وضعت ضمنها, فينصح بإبعاد العنفة خلف العائق بمسافة تعادل عشرين مثل ارتفاع العائق وينصح أيضاً بتمركز الدوار على ارتفاع يعادل ثلاثة أمثال ارتفاع العائق, هذا ما يوضحه الشكل (1-6), / 1, 2, 6 /.



الشكل (1-6) اضطراب الرياح خلف العائق

- كما تؤثر خشونة سطح الأرض بشكل كبير على سرعة الرياح وعلى كيفية تغير سرعات الرياح مع الارتفاع عن سطح الأرض (التدرج الشاقولي لسرعة الرياح) وقد وضعت حسابات خاصة لدارسة تأثير خشونة سطح الأرض على سرعات الرياح لتساعد الدارسين عند وضع التصاميم, حيث تعتمد هذه الدراسات بشكل أساسي على مقدار يسمى طول الخشونة (أو معامل الخشونة) وهو مقدار الارتفاع عن سطح الأرض الذي يبقى الهواء ضمنه ساكن ويتعلق بطبيعة وخواص سطح الأرض. يبين الشكل(1-7) رسم توضيحي لمفهوم معامل الخشونة والتدرج الشاقولي لسرعة الرياح, كما يبين الجدول(1-3) قيم معاملات الخشونة عند خواص مختلفة لسطح الأرض, / 1, 3, 6 /.



الشكل(1-7) معامل الخشونة والتدرج الشاقولي لسرعة الرياح

معامل الخشونة z_0 mm	طبيعة سطح الأرض
0.01	سطح ناعم جداً : الجليد , رمل
0.2	بحر هادئ و مفتوح
0.3	ثلج
0.5	بحر هائج
0.8	عشب
50	محاصيل
100	بعض الأشجار
250	أشجار كثيرة, بعض الأبنية
500	غابات
1500	ضواحي
3000	مركز مدينة ذات أبنية مرتفعة

الجدول(1-3) قيم معامل الخشونة عند خواص مختلفة لسطح الأرض

كما يتم حساب سرعة الرياح عند ارتفاع (z) ضمن مجال التدرج الشاقولي لسرعة الرياح بعد معرفة سرعة الرياح عند ارتفاع مرجعي (z_r) بحسب / 1, 6 / من خلال العلاقة اللوغارتمية التالية:

$$V_{(z)} / V_{(z_r)} = \ln(\frac{z}{z_0}) / \ln(\frac{z_r}{z_0}) \qquad (6-1)$$

حيث أن: z هو الارتفاع المرغوب معرفة سرعة الرياح عنده [m].

z_r هو الارتفاع المرجعي المقاسة سرعة الرياح عنده [m].

z_o هو معامل الخشونة [m].

$V_{(z)}$ هي سرعة الرياح المرغوب معرفتها عند الارتفاع (z) [m/sec].

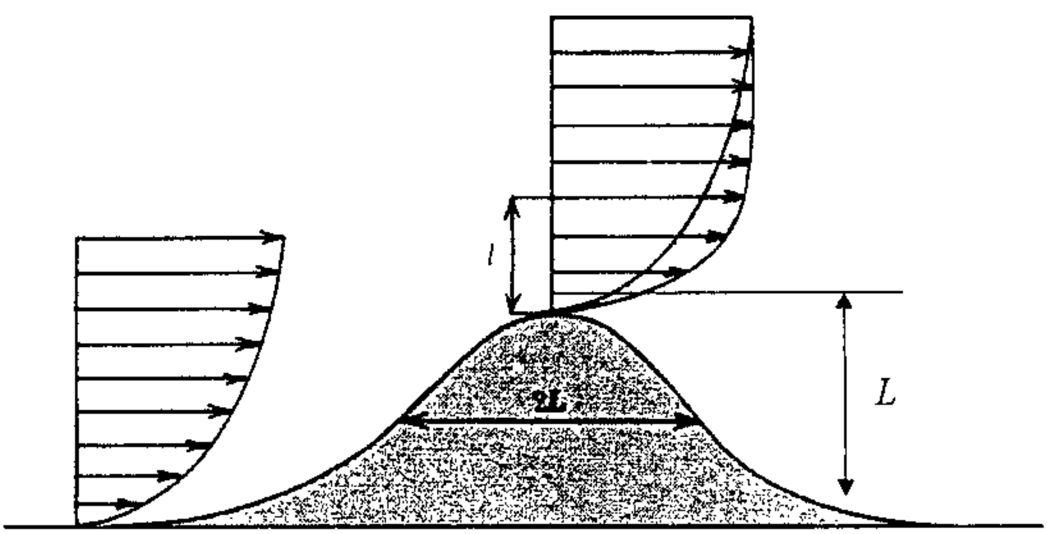
$V_{(zr)}$ هي سرعة الرياح المقاسة عند الارتفاع المرجعي (z_r) [m/sec].

– أما بالنسبة لتأثير التضاريس ففي حالة نصب العنفات الريحية على سفوح التلال والهضاب فتحتاج هذه الحالة لدراسة خاصة لتحديد الارتفاع المناسب لمركز الدوار فوق سفح التل, لكن عندما يكون عرض التل أو الهضبة أكبر بكثير من ارتفاع السفح عن سطح الأرض, كما في الشكل(1−8), فيمكن اعتماد العلاقة التالية لتحديد ارتفاع مركز الدوار عن مستوى السفح وذلك بحسب / 1 /:

$$l \cong 0.3 z_o (\frac{L}{z_o})^{0.67} \quad ....(7-1)$$

حيث أن: l هو ارتفاع مركز الدوار فوق سفح التل [m].

L هو ارتفاع سفح التل عن سطح الأرض [m].

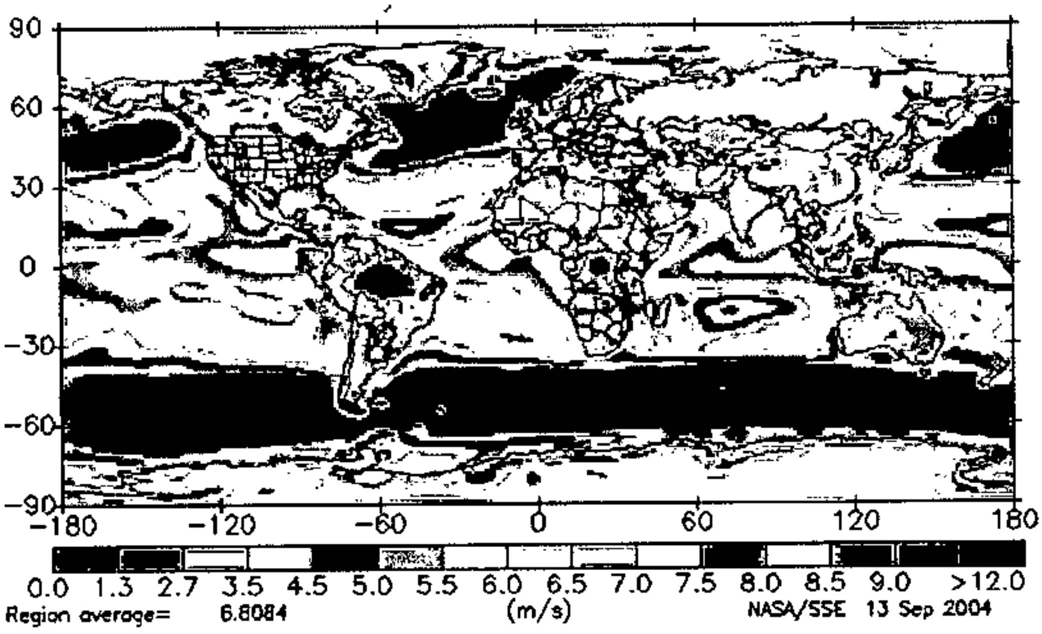


الشكل(1−8) جريان الرياح على قمم التلال والهضاب

1-3- واقع الاستثمار الحالي لطاقة الرياح على الصعيد العالمي:

أصبحت طاقة الرياح واحدة من أهم أشكال الطاقات البديلة وذلك لأسباب عديدة أهمها:

1- توفر طاقة الرياح بشكل فعّال يمكن استغلاله كمصدر للطاقة في مناطق كثيرة من العالم ويبين الشكل(1-9) صورة مأخوذة من الأقمار الصناعية لتحديد المتوسط السنوي لسرعة الرياح عند ارتفاع 50m من سطح الأرض لمختلف أنحاء الكرة الأرضية حيث تظهر هذه الصورة الكمون الريحي الكبير المتوفر في العديد من مناطق العالم, / 2, 19, 20 /.



الشكل (1-9) صورة من الأقمار الصناعية للكمون الريحي المتوفر بالعالم

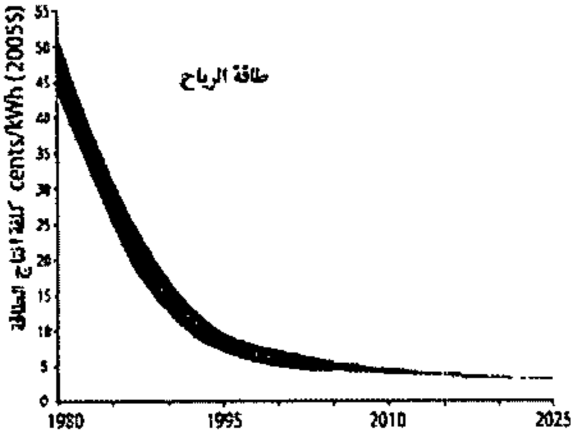
2- مساهمة تطور علم الطيران بشكل كبير في دعم وتطوير أبحاث طاقة الرياح والتسريع في انتقالها إلى حيز التطبيق, / 2 /.

3- ساهم تطور الخبرات والعلوم الهندسية في مجال إنشاء المنصات النفطية البحرية في تقديم دعم كبير لتشييد العنفات الريحية البحرية(وهي العنفات التي تنصب في عرض البحر), / 2 /.

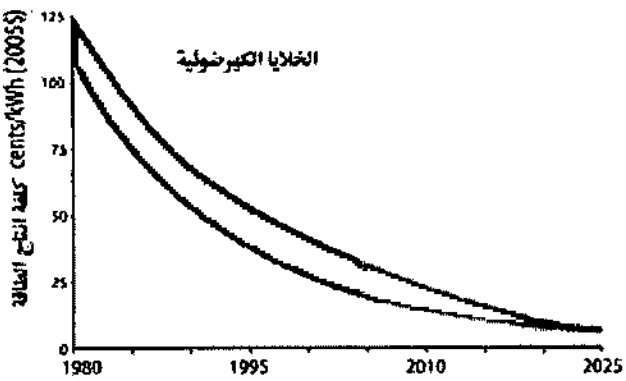
4- دعم الكثير من الحكومات في أوروبا لطاقة الرياح من خلال وضع القوانين

والتشريعات التي تشجع المستثمرين والشركات والباحثين لتوظيف أموالهم ومعارفهم في استغلال هذه الطاقة خاصة بعد أزمة النفط التي ظهرت في عام1973. أما في الوقت الراهن يزداد اهتمام دول غرب أوروبا بالطاقات البديلة وخاصة بطاقة الرياح نظراً لافتقارها لمخزون الوقود الاحفوري وكونها تعتمد بشكل كبير على الغاز الطبيعي الذي تشتريه من روسيا, / 2 /.

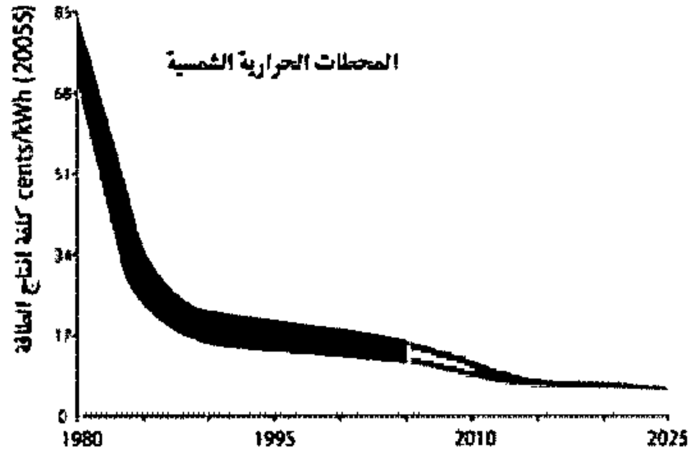
5- انخفاض كلفة واحدة الطاقة الكهربائية المنتجة من الرياح بالمقارنة مع الأشكال الأخرى من الطاقات البديلة كالخلايا الضوئية والمحطات الحرارية الشمسية لتوليد الطاقة الكهربائية. ويبين الشكل(1-10-أ-ب-ج) مقارنة لتكاليف إنتاج واحدة الطاقة بين هذه الطرق حتى نهاية عام 2008 وكيفية تطور هذه التكاليف حتى عام 2025, / 19, 22 /.



الشكل(1-10-أ) تكاليف إنتاج واحدة الطاقة من الرياح



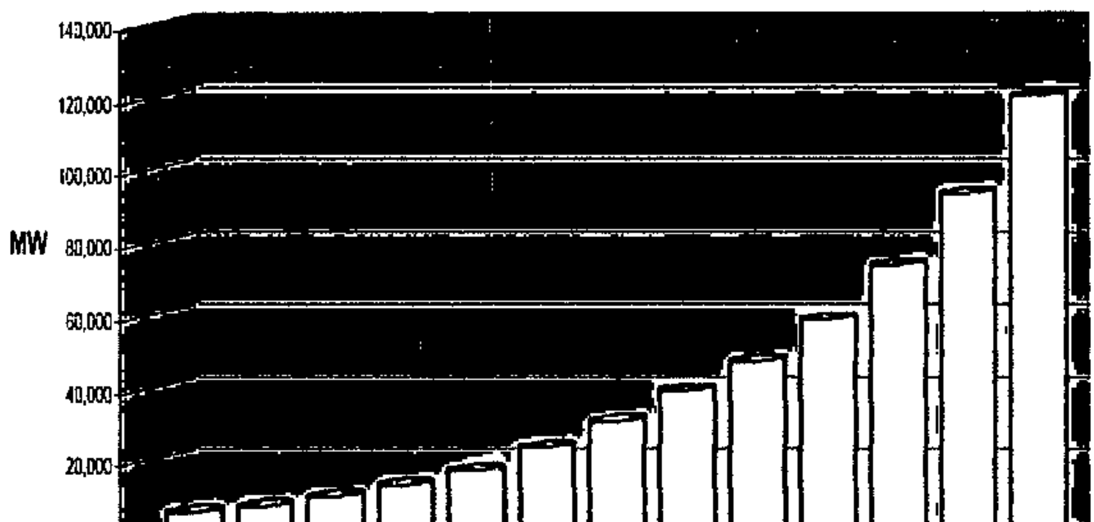
الشكل(1-10-ب) تكاليف إنتاج واحدة الطاقة من الخلايا الكهرضوئية



الشكل(1-10-جـ) تكاليف إنتاج واحدة الطاقة من المحطات الحرارية الشمسية

الشكل(1-10) مقارنة تكاليف إنتاج واحدة الطاقة بأشكال مختلفة من الطاقات البديلة

- لقد ازداد استغلال طاقة الرياح على الصعيد العالمي بشكل كبير خلال العقد الماضي ويظهر ذلك جلياً من خلال الشكل(1-11) الذي يظهر تطور الاستطاعة المولدة من الرياح على مستوى العالم في الفترة بين عام 1996 وحتى نهاية عام 2008, / 19 /.



1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
6,100	7,600	10,200	13,600	17,400	23,900	31,100	39,431	47,620	59,091	74,052	93,823	120,791

الشكل(1-11) تطور الاستطاعة المنتجة عالمياً من طاقة الرياح

ويبين الجدول (1-2) أكثر عشرة دول استغلالاً لطاقة الرياح ومقدار الاستطاعة المنتجة من طاقة الرياح في كل منها ونسبة مشاركتها بالاستطاعة العالمية المنتجة وذلك حتى نهاية عام 2008, / 19 /.

الدولة	الاستطاعة المولدة من طاقة الرياح (GW)	نسبة مشاركتها من الطاقة العالمية الإجمالية (%)
الولايات المتحدة الأمريكية	25.170	20.8
ألمانيا	23.903	19.8
إسبانيا	16.754	13.9
الصين	12.210	10.1
الهند	9.645	8
الدانمارك	3.810	3.15
إيطاليا	3.736	3
فرنسا	3.404	2.8
بريطانيا	3.241	2.7
البرتغال	2.862	2.4
الإجمالي لهذه الدول	104.753	86.7
الإجمالي العالمي	120.791	

الجدول(1-4) أكثر عشر دول استغلالاً لطاقة الرياح حتى نهاية عام 2008

أما ما تبقى من توليد للطاقة الكهربائية من الرياح فتتوزع بنسب مختلفة بين بعض من الدول في أمريكا اللاتينية وفي القارة الإفريقية والشرق الأوسط.

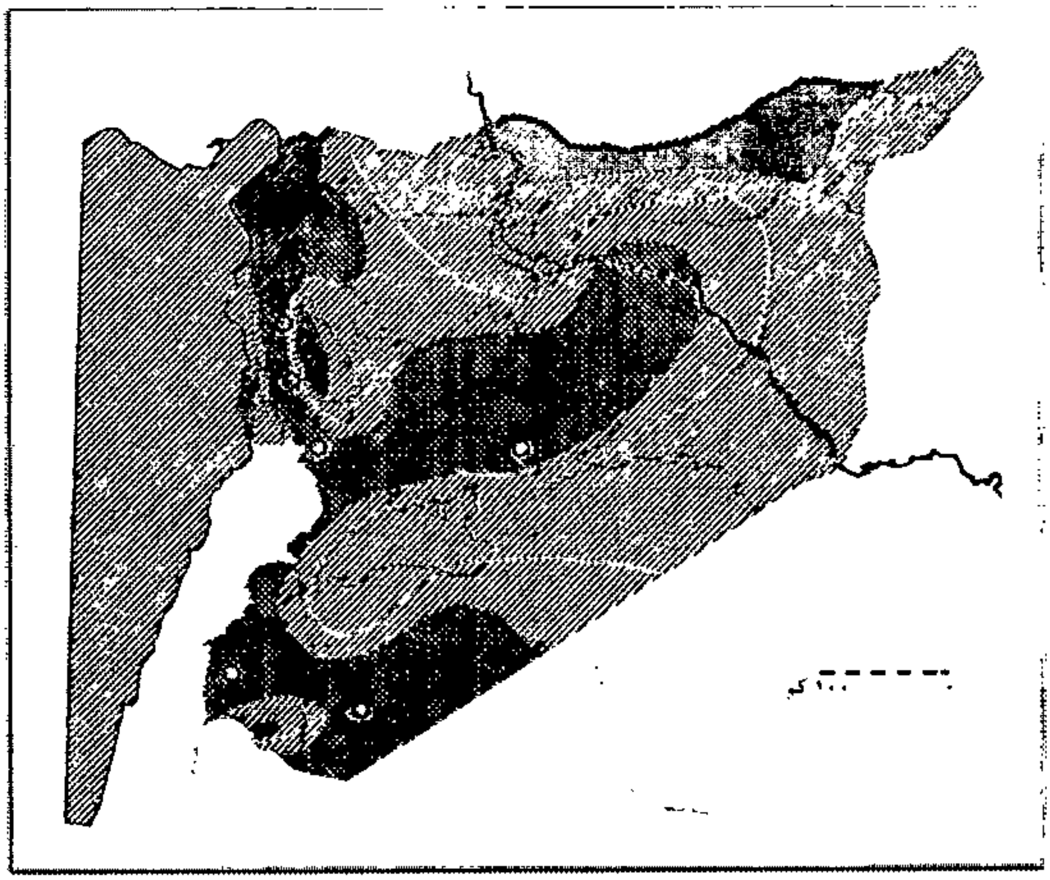
تعتبر جمهورية مصر العربية من أكثر الدول العربية توليداً للطاقة الكهربائية من طاقة الرياح ويبين الجدول(1-5) تطور مقدار الاستطاعة الكهربائية المولدة من طاقة الرياح في مصر حتى نهاية العام 2008, / 19 /

السنة	الاستطاعة المولدة [MW]
2000	5
2001	5
2002	68
2003	98
2004	145
2005	145
2006	230
2007	310
2008	365

الجدول(1-5) تطور استغلال طاقة الرياح في مصر حتى نهاية عام 2008

1-4- موارد طاقة الرياح في الجمهورية العربية السورية:

تتوفر لدى الجمهورية العربية السورية مناطق غنية بالكمون الريحي ولتحديد العائد الاقتصادي من استثمار هذه الطاقة تم إجراء مسح لأراضي الجمهورية لإعداد أطلس رياح رُسمت فيه خارطة ملونة توضح مدى توفر الموارد الريحية في الجمهورية العربية السورية, قارن الشكل(1-12), محسوبة عند ارتفاع قدره (50m) عن سطح الأرض المجاورة لخمس حالات طبوغرافية مختلفة, حيث تم تقسيم الموارد المتوفرة إلى أربعة فئات تم تمييز كل منها بلون محدد وتم تحديد المتوسط السنوي للاستطاعة النوعية للرياح المتوفر في كل فئة من الموارد بحسب طبيعته الطبوغرافية سواء كانت هذا الموقع ضمن مناطق غير مكشوفة أو مناطق مكشوفة أو عند شاطئ البحر أو تلال وجروف, / 1 /.



الشكل(1-12) خارطة الموارد الريحية في سورية

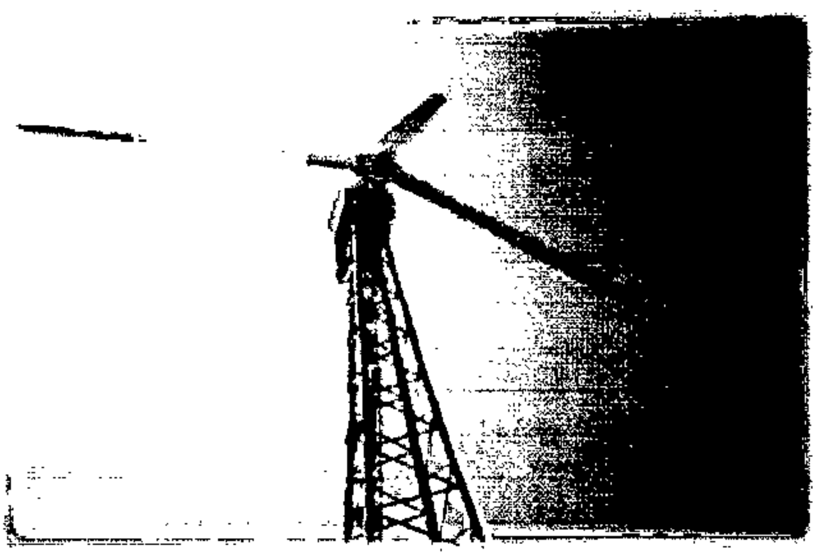
يبين الجدول(1-6) قيم المتوسط السنوي للاستطاعة النوعية للرياح مقدرة بـ $[W/m^2]$ والمتوفرة في كل منطقة بحسب طبيعتها الطبوغرافية وذلك تبعاً للون فئة المورد الريحي الوارد في خارطة الرياح الملونة. / 1 /.

أراض غير مكشوفة	مساحات مكشوفة	عند شاطئ البحر	سطح البحر المكشوف	التلال والجروف
250-150	500-300	700-400	800-600	1800-1200
150-100	300-200	400-250	600-400	1200-700
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
أقل من 50	100-50	150-100	200-150	400-200

الجدول(1-6) المتوسط السنوي للاستطاعة النوعية للرياح لعدة مناطق في سورية مختلفة بخواصها الطبوغرافية

- أما بالنسبة لتوليد الكهرباء من طاقة الرياح في الجمهورية العربية السورية تم تركيب عنفة ريحية أفقية في مدينة البعث ضمن محافظة القنيطرة وذلك في عام 1994 تبلغ استطاعتها (150kW) وارتفاع مركز دوارها عن سطح الأرض (30m), الدوار مكون من ثلاث ريشات ويبلغ قطره (28m). الشكل(1-13) يبين صوراً لهذه العنفة, / 21 /.





الشكل(1-13) العنفة الريحية المركبة في مدينة البعث

الفصل الثاني

العنفات الريحية

2-1 تعريف العنفة الريحية:

هي آلة لتحويل طاقة الرياح إلى طاقة حركية متمثلة بدوران محور العنفة الذي يقود بدوره إما مولدة كهربائية أو غيرها من آلات العمل.

يتم تصنيف العنفات الريحية بحسب الاستطاعة الكهربائية التي تنتجها إلى, / 2 /:

- العنفات الريحية الصغيرة: تصل الاستطاعة التي تولدها حتى 50 kW.
- العنفات الريحية المتوسطة: تراوح الاستطاعة المولدة منها من 50kW وحتى 250kW
- العنفات الريحية الكبيرة: تراوح استطاعتها من 250kW وحتى 1MW.
- العنفات الريحية العملاقة: تزيد استطاعتها عن 1 MW.

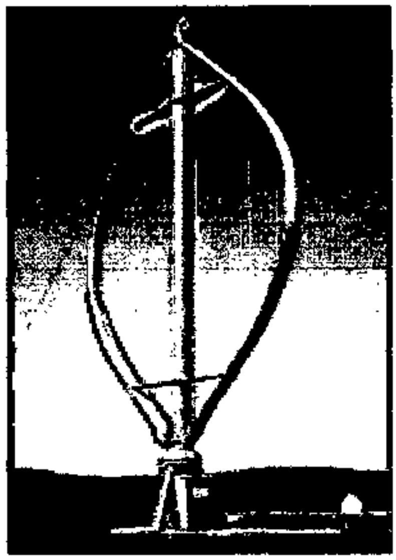
تقسم العنفات الريحية بحسب توضع محور الدوران إلى قسمين, / 2, 6 /:

- العنفات الريحية ذات محور دوران أفقي: يأخذ محور الدوران فيها وضعية أفقية موازية لاتجاه ورود الرياح.
- العنفات الريحية ذات محور دوران شاقولي: يأخذ محور الدوران فيها وضعية شاقولية يتعامد فيها مع اتجاه ورود الرياح.

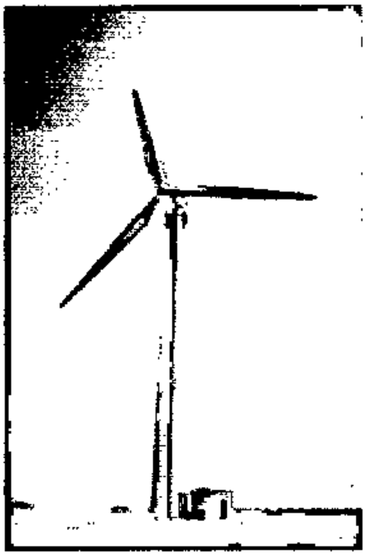
وتقسم العنفات الريحية أيضا بحسب القوة التي تديرها إلى قسمين:

- العنفات الريحية التي تدور بفعل قوة الرفع الآيروديناميكية الناتجة عن جولان الهواء حول مقطع انسيابي للريشات كالعنفات الريحية الأفقية الحديثة وكعنفة داريوس الشاقولية التي تتميز بعملها عند سرعات دوران كبيرة, الشكل(2-1).

٦٩١٢٤٦



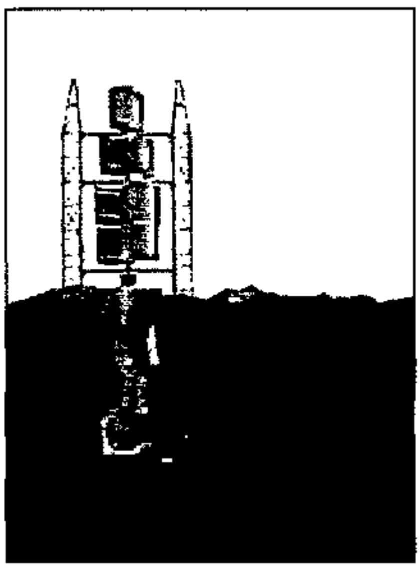
دوار داريوس المغزلي



عنفة ريحية أفقية حديثة

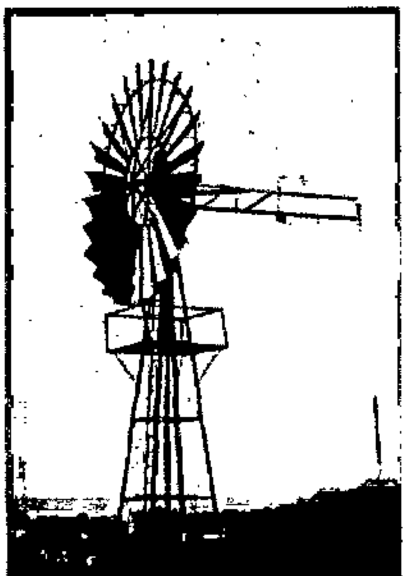
الشكل(2−1) عنفات ريحية تدور بفعل قوة الرفع الآيروديناميكية

− العنفات الريحية التي تدور بفعل قوة دفع الرياح كالدوار الأمريكي الأفقي متعدد الريشات ودوار سافونيوس الشاقولي التي تتميز بعزم إقلاعها الكبير, / 2, 3, 6, 7 /.



دوار سافونيوس الشاقولي

متعدد الطبقات (أ)



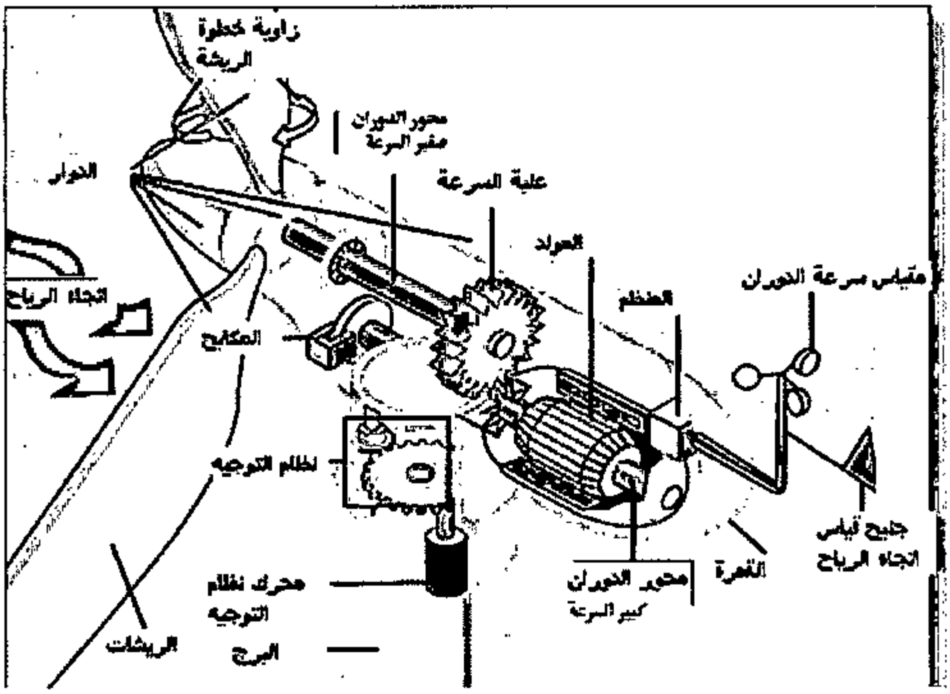
الدوار الأمريكي الأفقي

متعدد الريشات(ب)

الشكل(2−2) دوارات ريحية تدور بفعل قوة دفع الرياح

2-2- العنفات الريحية الأفقية الحديثة:

يتوضع محور الدوران في هذا النوع من العنفات بشكل أفقي موازي لاتجاه الرياح وتتميز هذه العنفات بمردودها الكبير نسبياً واستقرار عملها نسبياً عند تغير سرعة الرياح. تتكون العنفات الريحية الأفقية الحديثة ذات المحور الأفقي من الأجزاء الأساسية الموضحة بالشكل(2-3) وهي, / 2, 3, 6 /:



الشكل (2-3) أجزاء العنفات الريحية الأفقية الحديثة

1- الدوار: يتألف من السّرة التي تثبت عليها الريشات وترتبط السّرة بدورها مع محور الدوران الرئيس (ذو سرعة الدوران القليلة). يجب أن تصمم الريشات ليكون لمقطعها شكل آيروديناميكي انسيابي مناسب يجعلها تتأثر بقوة رفع الهواء فتنتج طاقة حركية دورانية تدير محور العنفة الرئيس معها. وتشكل كلفة تصنيع الدوار نسبة حوالي (20%) من كلفة تصنيع العنفة بالكامل.

2- السلسلة الناقلة للحركة: تتكون من مجموعة الأجزاء التالية :

- محور الدوران الرئيس قليل سرعة الدوران: ويتلقى الحركة من سرّة الدوار.
- محول السرعة: تتكون من مجموعة مسننات تقوم بزيادة سرعة الدوران

حتى تصبح مناسبة لعمل المولدة. كما توجد تصاميم حديثة للعنفات الريحية لا تحوي محول للسرعة وإنما تستخدم مولدة مصممة خصيصاً بعدد كبير من الأقطاب لتربط بشكل مباشر مع الدوار.

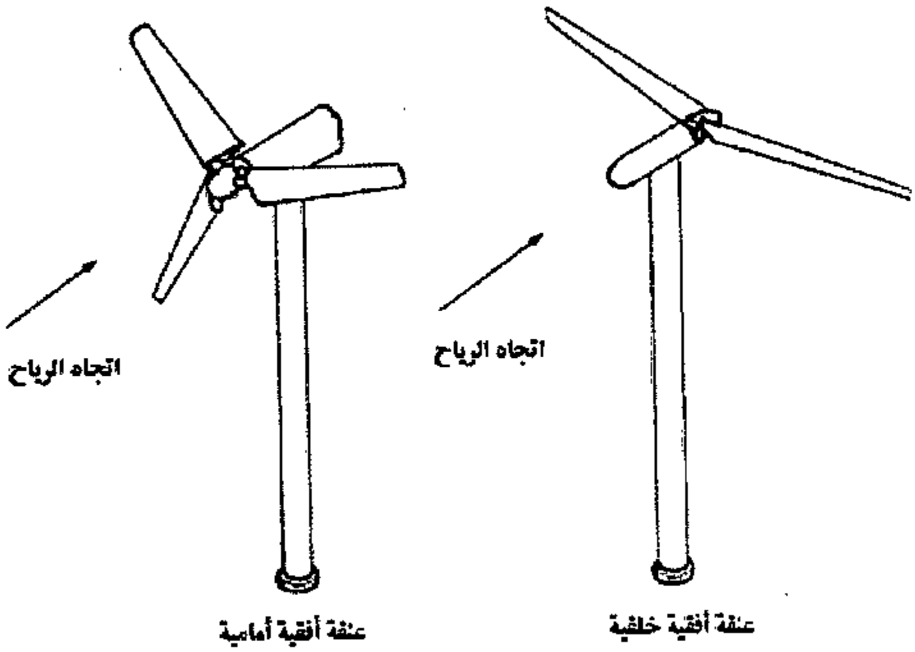
- محور الدوران كبير سرعة الدوران: يأخذ حركته من محولة السرعة وينقلها إلى محور المولدة. تشكل كلفة تصنيع السلسلة الناقلة للحركة مع المكابح الميكانيكية نسبة تقدر حوالي (30%) من كلفة تصنيع العنفة.

3- المولدة: تستخدم العنفات الريحية الحديثة المولدات التحريضية وهي الأكثر انتشاراً في مجال طاقة الرياح بسبب متانتها الكبيرة وخفة وزنها ورخص ثمنها, كما تستخدم بعض التصاميم المولدات التزامنية التي تحافظ على استقرار وانتظام التيار المولَّد بشكل كبير عند تذبذب سرعة الدوران. تشكل كلفة تصنيع المولدة مع المنظومة الكهربائية و نظام التحكم نسبة حوالي (15%) من كلفة تصنيع العنفة.

4- القمرة: تصمم القمرة لتؤمن أفضل توضع لمجموعة الأجزاء الموجودة بداخلها بأقل حجم ممكن وبانسيابية كبيرة ومهمتها حماية المجموعة من العوامل المناخية, فتصنع القمرة بالتالي من مواد خفيفة الوزن وذات متانة عالية بحيث يركب بداخلها قاعدة التثبيت لتشد عليها مجموعة نقل الحركة والمولدة وتوابعها. كما تعزل القمرة من الداخل بمواد عازلة للصوت بهدف تقليل الضجيج الناتج من دوران الأجزاء الموجودة داخلها.

5- نظام التوجيه: مهمته المحافظة على وضعية الدوار بشكل مواجه للرياح ما أمكن. ويُستخدم هذا النظام بشكل أساسي في العنفات الريحية الأفقية الأمامية (التي يعبر فيها تيار الرياح عبر الدوار و يمر بعدها حول القمرة), يعتمد التوجيه في العنفات الريحية الأفقية الأمامية ذات الاستطاعة الصغيرة والمتوسطة على جنيح يتوضع عند أعلى طرف القمرة من الخلف, أما في العنفات ذات الاستطاعة الكبيرة والعملاقة فيكون التوجيه ميكانيكياً/هيدروليكياً وبالاعتماد على محرك توجيه وحيد أو محركين اثنين, حيث يوصل كل منهما مع مسننات تقوم بتدوير المحمل الموصول مع البرج ويتم التحكم بهذه الآلية عن طريق حساس لاتجاه

الرياح مركب بأعلى القمرة من الخلف. أما في العنفات الخلفية فيكون نظام التوجيه حراً (يمر تيار الرياح في العنفات الريحية الأفقية الخلفية حول القمرة ليعبر بعدها إلى الدوار)، الشكل(2–4) يبين العنفات الريحية الأفقية الأمامية والخلفية. تشكل كلفة تصنيع القمرة ونظام التوجيه نسبة تقدر حوالي (10%) من كلفة تصنيع العنفة وذلك بالنسبة للعنفات الكبيرة والعملاقة.



الشكل(2–4) العنفات الريحية الأفقية الأمامية والخلفية

6- البرج والأساسات: يجب على البرج تأمين أعلى ارتفاع ممكن للقمرة لجني أكبر استطاعة ممكنة من الرياح المتوفرة حيث تزداد سرعة الرياح مع ازدياد الارتفاع وبحسب العلاقة (1–1) ستزداد الاستطاعة المولدة أيضاً، كما يجب أن يتميز البرج بالمتانة الكبيرة وخفة الوزن والكلفة القليلة. أما الأساسات فيجب أن تكون ذات مقدرة كافية للحفاظ على هذه العنفات بحالة ثبات في مختلف ظروف العمل وتحت تأثير مختلف الأحمال التي تتعرض لها، تشاد هذه الأساسات من الاسمنت المسلح المصمم والمنفذ بشكل خاص لهذه الغاية حيث يتم اختيار خلطة الاسمنت المسلح بما يتناسب مع الأحمال المؤثرة وطبيعتها وذلك بعد مراعاة نوع

التربة ومقاومتها. أما إذا نصبت العنفة الريحية في أرض صخرية فتزرع قضبان الحديد في الأرض عبر ثقوب عميقة تحفر في الصخور لتقوم هذه القضبان بدور ركائز لتحقيق التوازن للعنفة الريحية. تشكل كلفة تصنيع البرج وتنفيذ الأساسات نسبة تصل إلى (25%) من كلفة تصنيع العنفة ككل.

7- نظام التحكم: يجب أن يتمتع نظام توليد الطاقة الكهربائية في الوحدات الريحية بميزة أساسية هي العمل بشكل مستقر ما أمكن عند مختلف السرعات التي تتعرض لها مجموعة نقل الحركة عند تغير سرعات الريح المتوفرة, وتقوم حالياً العناصر الإلكترونية بالحفاظ على استقرار عمل العنفة الريحية عند سرعات مختلفة للرياح ونظام التحكم وهذا مهم جداً بالنسبة للعنفات الريحية وذلك لأنه يتحكم بتشغيل الآلة وبالتالي بالطاقة المنتجة, هذا ويتضمن نظام التحكم العناصر التالية :

1-الحساسات: من أهمها حساس قياس سرعة الرياح, حساس تحديد اتجاه الرياح, حساس قياس درجة حرارة الوسط المحيط, حساس قياس الضغط الجوي, إضافةً لمقياس شدة التيار والجهد الناتج من المولدة .

2-العناصر التحكمية الميكانيكية كالصمامات والمضخات الهيدروليكية.

3-العناصر التحكمية الكهربائية مثل الكونتاكتورات والريليات والحمايات.

4-العناصر التحكمية الإلكترونية والحاسب.

ويعمل نظام التحكم على ما يلي :

أ- ضبط الحد الأعلى للعزم المنقول عبر سلسلة نقل الحركة .

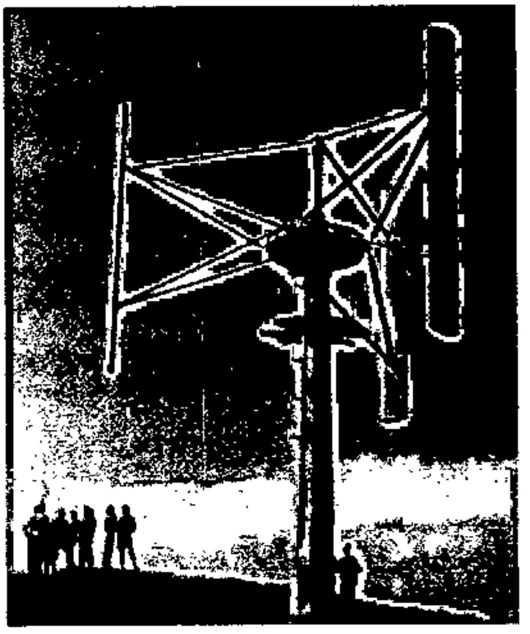
ب- المساعدة على زيادة فترة استخدام عناصر العنفة العاملة وحمايتها عند هبوب الرياح بسرعات كبيرة تفوق السرعة المسموح بها لعمل أجزاء العنفة.

ج- التحكم بالاستطاعة الناتجة.

8- المكابح الميكانيكية: التي تقوم بإيقاف العنفة كمرحلة ثانية من الكبح بعد أن يتم كبح العنفة آيروديناميكياً كمرحلة أولى.

2- 3- العنفات الريحية ذات محور الدوران الشاقولي:

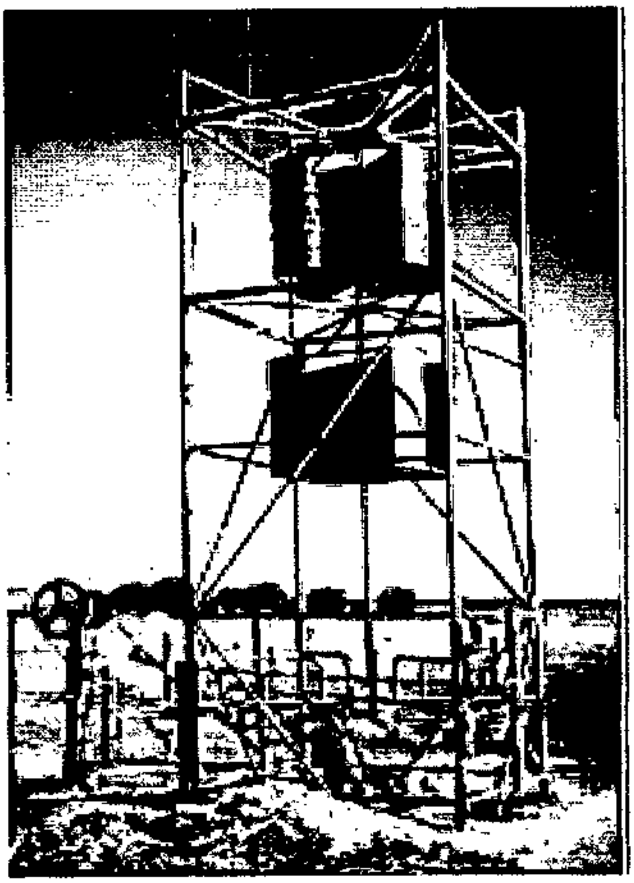
يتوضع محور الدوران في هذا النوع من العنفات بشكل شاقولي عمودي على مجرى الرياح. يعتبر دوار داريوس (هو موضوع هذا البحث) من العنفات الريحية ذات محور الدوران الشاقولي الذي يدور بتأثير قوى الرفع الآيروديناميكية المتولدة من جولان الهواء حول مقطع الريشات الانسيابي المتصلة مع محور الدوران بواسطة أذرع التوصيل, فيشابه بذلك عمل ريشات دوار داريوس عمل ريشات معظم العنفات الريحية الأفقية الحديثة وأجنحة الطائرات. تم تسمية دوار داريوس بهذا الاسم نسبة للعالم جورج جيمس داريوس الذي حصل على براءة اختراع عام 1931 في الولايات المتحدة الأمريكية فكان الشكل الأول للدوار هو شكل المغزل الثنائي والثلاثي الريشات, ثم جاء الدوار ذو الريشات الشاقولية المستقيمة وهذه الدوارات مبينة بالشكل(2-1) والشكل(2-5) .



الشكل (2-5) دوار داريوس ذو الريشات المستقيمة

كما توجد دوارات ريحية شاقولية أخرى كدوار سافونيوس المبين بالشكل(2-6) والمُعتمد بعمله على قوى دفع الرياح لنصفي اسطوانتين مقصوصتين بمستوي شاقولي ومتوضعتين باتجاهين متعاكسين مع وجود تداخل مناسب بينهما, أي يشابه

بعمله دفع الرياح لأشرعة السفن. تقل قيمة السرعة المحيطية في دوار سافونيوس عند منتصف نصف الاسطوانة لهذا الدوار عن سرعة التيار الريحي الذي يدفعها ويدورها أي أنها لا تناسب التطبيقات التي تحتاج لسرعات دوران كبيرة, إلا أن ما يميز هذا الدوار عن دوار داريوس قدرته على الإقلاع عند سرعات رياح صغيرة نسبياً إضافة إلى عزم الدوران الكبير المتولد على محوره عند سرعات دوران صغيرة وبالتالي فإنه يناسب تدوير مضخات المياه التي تعمل بمبدأ الإزاحة الحجمية (كالمضخات المكبسية والمضخات الغشائية), يبين الشكل(2-6) دوار سافونيوس متعدد الطبقات المستخدم لضخ المياه عبر مضخة تعمل بمبدأ الإزاحة الحجمية, / 2, 6, 7, 18 /.

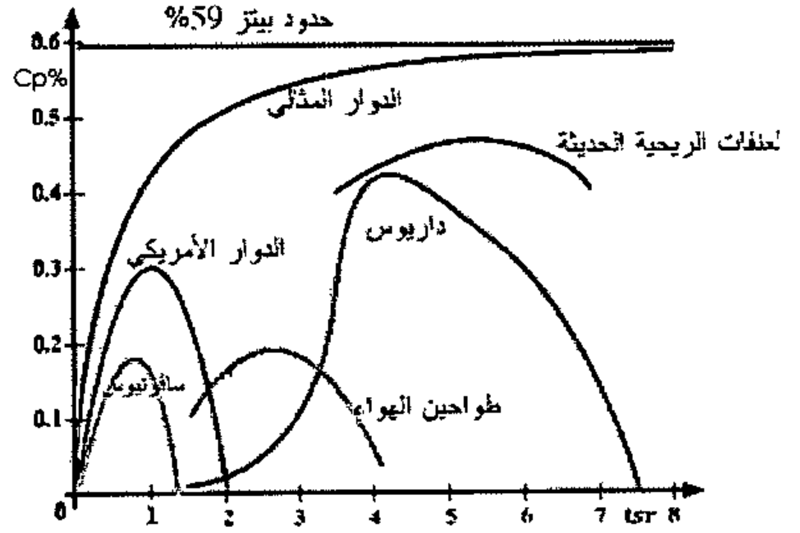


الشكل(2-6) دوار سافونيوس يستخدم لضخ المياه

2-4- منحنيات الأداء للعنفات الريحية:

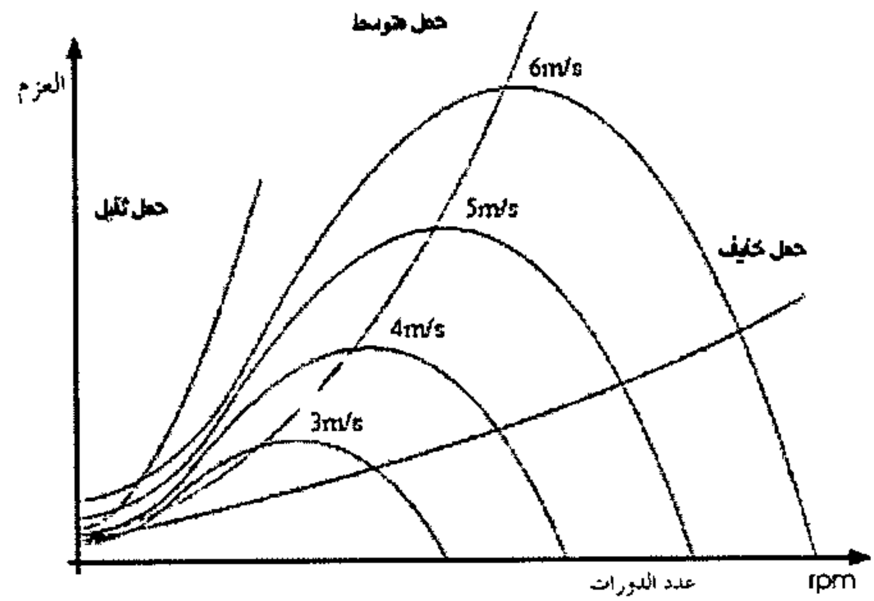
يوصف عادة مردود أو أداء أي دوار ريحي بواسطة منحني يظهر تغير معامل الاستطاعة (وهو نسبة الاستطاعة المتولدة من الدوار إلى الاستطاعة المتوفرة في التيار الريحي الذي يتدفق عبر الدوار) مع نسبة السرعة المحيطية (وهي نسبة السرعة المحيطية لطرف الريشة في دوار داريوس والعنفات الأفقية إلى سرعة التيار الحر للهواء المتدفق, أما بالنسبة لدوار سافونيوس هي نسبة السرعة المحيطية عند مركز نصف الاسطوانة إلى سرعة التيار الحر للهواء المتدفق) ويوضح الشكل(2-7) منحنيات الأداء لأهم أنواع الدوارات الريحية الأفقية منها والشاقولية والتي لاقت حيزاً واسعاً من التطبيق العملي, حيث يلاحظ أن مردود أي من هذه الدوارات محدود بما يسمى بحدود بيتز وتبلغ نسبته المئوية (59%) والتي لا يمكن عملياً تجاوزها. يوضح هذا الشكل أيضاً أنّ الدوارات التي تعتمد على قوة الدفع لتحريكها كدوار سافونيوس الشاقولي والدوار الأمريكي الأفقي متعدد الريشات لها قيمة مثلى صغيرة لنسبة السرعة المحيطية ولمعامل الاستطاعة بالمقارنة مع الدوارات الأخرى المعتمدة على قوة الرفع كدوار داريوس الشاقولي ودوارات العنفات الأفقية الحديثة. تبين المنحنيات المسطحة للدوارات الأفقية قدرتها الحفاظ على معامل استطاعة كبير ضمن مجال واسع لتغير نسبة السرعة المحيطية. بينما تظهر المنحنيات المدببة كمنحني دوار داريوس بأن الدوار يعمل بمردوده الأعظمي ضمن مجال ضيق لتغير نسبة السرعة المحيطية, فإذا دار الدوار بسرعة لا تقع ضمن هذا المجال فإنه سيعاني من نقصان شديد بمعامل الاستطاعة وبإمعان النظر أيضاً بمنحني دوار داريوس يلاحظ نقصان كبير بمعامل الاستطاعة عند نسبة سرعة محيطية صغيرة مما يؤكد على ضعف عزم الإقلاع الذاتي له وتعاني من هذه المشكلة أيضاً دوارات العنفات الريحية الأفقية الحديثة حيث يتم التغلب عليها بجعل المولدة الكهربائية المرتبطة مع الدوار تعمل كمحرك كهربائي يُغذى من الشبكة العامة ليقلع بالدوار حتى يصل إلى سرعة مناسبة تساعده على متابعة العمل ذاتياً, لكن المشكلة تكمن في المناطق المعزولة كهربائياً

حيث لا توجد شبكة كهربائية يمكن الاعتماد عليها في مرحلة إقلاع الدوار, / 2, 3, 6, 7 /.



الشكل (2-7) منحنيات الأداء لأكثر الدوارات الريحية انتشاراً

2-5- وصل الدوار الريحي مع الحمل:



الشكل(2-8) وصل دوار داريوس مع الحمل

يتكون النظام الريحي من الدوار والحمل وآلية الوصل بينهما ويعتمد مردود هذا النظام على مردود كل عنصر من عناصره, يبين الشكل(2-8) منحنيات تغير

عزم دوار داريوس كتابع لسرعة دوران الدوار عند سرعات مختلفة للرياح (المنحنيات الملونة باللون الأسود) وتبين المنحنيات الأخرى (الملونة) علاقة تغير عزم الحمل المطبق مع سرعة دوران. عند دراسة منحني عزم الدوار الموافق لسرعة رياح قدرها (6m/sec) وعلى اعتبار أن الحمل الموصول مع الدوار هو حمل متوسط سيتسارع الدوار في البداية من الصفر وحتى تصبح سرعة دورانه موافقة لنقطة العمل (نقطة تقاطع منحني الحمل مع منحني عزم الدوار) وعند رسم منحنيات عزم الدوار عند سرعات رياح مختلفة فإن نقاط التقاطع مع منحني الحمل المتوسط ستبين نقاط عمل الدوار عند سرعات مختلفة للرياح ولا تكون في هذه الحالة الاستطاعة الموافقة لنقطة العمل مساوية لاستطاعة خرج النظام وذلك بسبب الضياعات الميكانيكية والكهربائية. يظهر الشكل(2-8) أيضا حملين مختلفين, أحدهما حمل ثقيل والآخر حمل خفيف فالحمل الخفيف ينتج للدوار دوراناً سريعاً مما يقلل من قيمة معامل الاستطاعة وكذلك فإن الحمل الثقيل يُرغم الدوار على الدوران بسرعات قليلة مما يقلل من قيمة معامل الاستطاعة أيضاً, بالتالي يجب مراعاة طبيعة الحمل ورسم منحني العمل له واختيار الدوار المناسب ليقود هذا الحمل, / 2, 3, 6, 7 /.

2-6- أنواع الأحمال المؤثرة على العنفات الريحية ومصادرها:

تؤثر على العنفة الريحية مجموعة من الأحمال التي يتم على أساسها تصميم أجزاء العنفة وبشكل خاص منها الدوار والبرج الأكثر تأثراً بهذه الأحمال, تقسم هذه الأحمال إلى الأنواع التالية, / 2, 6 /:

1- أحمال ثابتة: وهي القوى الثابتة المؤثرة على الأجزاء التي تكون بحالة سكون, فيؤثر مثلاً تيار الرياح على الريشات وهي في حالة السكون بقوى عمودية على سطح الريشة وبالتالي تنتقل هذه القوى إلى باقي أجزاء العنفة و تؤثر على البرج والأساسات بشكل كبير .

2- الأحمال المطردة: وهي أحمال لا تتغير مع الزمن, لكن تؤثر على الأجزاء التي تكون بحالة حركة. يعتبر تأثير تيار الرياح المستقر على الدوار وهو في حالة العمل مصدراً لمثل هذه القوى المؤثرة على الريشات والتي تنتقل بالتالي عبر نقاط الربط إلى الأجزاء الأخرى من العنفة فتؤثر على البرج والأساسات أيضاً.

3- الأحمال الدورية: وهي الأحمال التي تتغير بشكل دوري مع الزمن والمنحني الزمني لهذه الأحمال يتغير بحسب دوران الدوار, تتعلق هذه القوى بعدة عوامل منها وزن الريشات وحركة نظام التوجيه وتدّرج سرعة الرياح بحسب الارتفاع عن سطح الأرض ويترافق عادة مع هذه القوى اهتزازات في العنفة.

4- الأحمال العابرة: تنشأ كرد فعل لمؤثرات خارجية, وتترافق في البداية مع اهتزاز لكنه يزول بمرور الوقت, تعتبر القوى الناتجة عن تطبيق الفرملة الميكانيكية والتي تؤثر على قاعدة التثبيت في القمرة إحدى هذه الأحمال العابرة.

5- الأحمال النبضية: وهي أحمال تتغير مع الزمن وتكون الفترة التي تؤثر خلالها قصيرة جداً إلا أنها ذات تأثير كبير إذ أنها تسبب تعباً كبيراً للأجزاء المتأثرة بها وتظهر مثل هذه الأحمال عادة في العنفات الريحية الأفقية الخلفية عند مرور ريشاتها بمنطقة الإظلال الريحي المتشكلة خلف البرج .

6 – الأحمال العشوائية: وهي أحمال تتغير بشكل عشوائي مع الزمن وتكون ذات قيمة وسطية ثابتة تقريباً, إلا أن قيمها اللحظية تتغير بشكل غير منتظم وغير دوري مع الزمن. تؤثر هذه الأحمال على الريشات والبرج نتيجة اضطراب الرياح ويكون تأثيرها على الريشات أكبر مما هو عليه في البرج وبالنسبة للعنفات البحرية فإن تأثير القوى الناتجة عن حركة الأمواج هو أحد هذه الأحمال العشوائية.

7- أحمال الرنين التحريضية: وهي أحمال دورية تؤثر على أجزاء مختلفة من العنفة وتحدث بتواتر قريب من التواترات الطبيعية لهذه الأجزاء وقد يتأثر جزء أو

آخر من العنفة بمثل هذه الأحمال عند ظروف معينة أو نتيجة أخطاء تصميمية, فعند تصميم أي جزء وبشكل خاص البرج يجب أخذ تأثير مثل هذه الأحمال بالاعتبار لأن تأثيرها خطير جداً وقد يؤدي إلى انهيار العنفة بالكامل .

توجد ثلاثة مصادر رئيسة للأحمال التي تتعرض لها العنفة وتتداخل تأثيرات هذه المصادر مع بعضها بشكل معقد جداً, وفيما يلي استعراض لهذه المصادر :

1- مصادر آيروديناميكية: وتعد المصدر الأساسي للقوى المؤثرة على العنفة الريحية, فعندما تكون العنفة بحالة العمل فإن قوى الرفع المؤثرة على الريشات تولد عزماً يدير الدوار وتقوم قوى الاحتكاك مع الهواء بإعاقة هذا الدوران, تؤثر الرياح أيضاً على البرج بقوى دفع كبيرة.

2- مصادر ناتجة عن ثقل أجزاء العنفة: وهي قوى الوزن الذاتي للأجزاء الموجودة ضمن القمرة إضافة لوزن الريشات والوزن الذاتي للبرج, حيث تقوم الأساسات الإسمنتية المسلحة بتحمل محصلة كل قوى الثقالة المؤثرة.

3- مصادر ناجمة عن أنظمة التحكم: كالقوى المؤثرة على معظم العنفات الريحية الأفقية الحديثة والتي تحوي نظاماً خاصاً لتوجيه الدوار في أثناء عمله فينتج بالتالي قوى ديناميكية تزداد قيمتها كلما ازداد مجال حركة نظام التوجيه بحد ذاته.

2-7- مقارنة بين العنفات الريحية الأفقية الحديثة وعنفة داريوس:

- تتجلى أهم النقاط التي يتميز بها دوار داريوس عن العنفات الريحية الأفقية الحديثة بما يلي, / 7 /:

1- لا يحتاج دوار داريوس لنظام توجيه إذ يمكنه الإقلاع عند هبوب الرياح من أي اتجاه ترد منه بسرعة مناسبة, كما أنه يحافظ على نفس اتجاه دورانه مهما كان اتجاه هبوب الرياح. في حين أن معظم العنفات الريحية الأفقية الحديثة تحتاج

لنظام توجيه ليحرك الدوار ويجعله بمواجهة مستمرة مع اتجاه هبوب الرياح مما يزيد من كلفة تصنيع هذه العنفات ويزيد من صعوبة صيانتها.

2- تتوضع عناصر نقل الحركة ومحول السرعة والمولدة والتجهيزات الأخرى في عنفة داريوس عند مستوى الأرض مما يسهل من عمليات الإنشاء والصيانة والاستثمار ويقلل من الأوزان التي تتحملها العنفة وبالتالي يقلل من تكاليف التصنيع. بينما تتوضع هذه الأجزاء على قمة البرج في العنفات الريحية الأفقية الحديثة مما يزيد من صعوبات الصيانة ويزيد من تكاليف التصنيع والإنشاء.

3- عند مقارنة عنفة داريوس وعنفة ريحية أفقية حديثة لهما نفس الاستطاعة تكون عنفة داريوس أقل ارتفاعاً وبالتالي أقل كلفة وأسهل من ناحية التصميم والتصنيع. كما أنها لا تسبب تلوث بصري كالذي تسببه العنفات الريحية الأفقية الحديثة.

4- إن تصميم وتصنيع المقاطع الانسيابية لعنفة داريوس أسهل وأقل كلفة من تصنيعها في العنفات الريحية الأفقية الحديثة التي تحتاج بدورها لريشات متغيرة المقطع على طول الريشة للحصول على أفضل مردود للعنفة مما يزيد من تكاليف التصنيع.

5- يمكن الاعتماد على قيم متوسطات سرعات الرياح المتوفرة في محطات الأرصاد الجوية و أطالس الرياح المناخية التي تؤخذ عادة على ارتفاع (10 m) وذلك عند اختيار دوار داريوس لأنه يعمل عند ارتفاع قريب من هذا الارتفاع, في حين أن العنفات الريحية الأفقية الحديثة تحتاج لقياسات لسرعة الرياح مأخوذة عند ارتفاعات أعلى تصل حتى(40 m) وهذا يستغرق زمناً أطول.

- أما النقاط التي تتميز بها العنفات الأفقية الحديثة عن عنفة داريوس فهي, / 7 /:

1- إن توضع الريشات بالقرب من مستوي الأرض في عنفة داريوس يجعلها تدور عند سرعات رياح صغيرة بالمقارنة مع العنفات الريحية الأفقية الحديثة التي تتوضع ريشاتها على ارتفاع كبير تتوفر عنده سرعات رياح أكبر بكثير من تلك التي تتوفر عند مستوي الأرض.

2- تحتاج بعض تصاميم عنفة داريوس إلى أمراس تثبيت مع الأرض مما يجعلها تشغل مساحات كبيرة من الأرض بعد نصبها وبالتالي فإنها تعيق أعمال الزراعة التي يمكن أن تستغل بها الأرض.

3- تتحمل المحامل الدحروجية السفلية لمحور الدوران كل الأوزان والأحمال التي تتعرض لها عنفة داريوس مما يزيد من أعطال هذه المحامل.

4- إن منحني الأداء لعنفة داريوس هو منحني مدبب مما يجعل مجال عمله بمردوده الأعظمي محصور ضمن مجال ضيق لتغير سرعات الرياح. في حين أن منحني أداء العنفات الريحية الأفقية الحديثة أكثر استقراراً وثباتاً مع تغير سرعة الرياح.

5- تتغير زاوية الهجوم لمقطع الريشة الانسيابي في عنفة داريوس أثناء الدوران مما يجعله يتعرض لعزوم متغيرة أثناء الدورة الواحدة حتى في حال ثبات سرعة الرياح وبالتالي ينتج عدم انتظام في سرعة دوران المحور. في حين تبقى العزوم المؤثرة على محور الدوران في العنفات الأفقية أكثر ثباتاً أثناء الدوران وذلك عند ثبات سرعة الرياح.

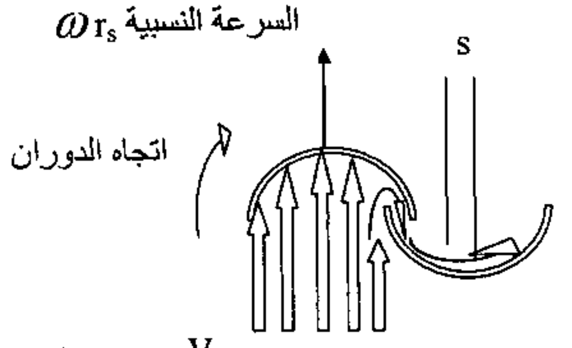
- يتصف كل من دوار داريوس والعنفات الريحية الأفقية الحديثة بعزم إقلاع ضعيف مما يجعلهم بحاجة لنوع من المساعدة عن الإقلاع ويُحقق ذلك عادة بجعل المولدة تعمل عند الإقلاع كمحرك يستجر تياراً كهربائياً من الشبكة العامة ليدير العنفة, إلا أن المشكلة تكمن في المناطق المعزولة عن الشبكة الكهربائية العامة مما يستدعي الحاجة إلى وسيلة إقلاع ميكانيكية مساعدة وهذا ما تم السعي إليه من خلال هذا البحث.

الفصل الثالث

تحليل أداء دوار سافونيوس ودوار داريوس

3-1 تحليل أداء دوار سافونيوس:

يعتمد دوار سافونيوس في عمله على دفع الرياح لإحدى نصفي اسطوانتين شاقوليتين متوضعتان باتجاهين متعاكسين لتدير المحور فتخرج من مجرى دفع الرياح لتدخل الاسطوانة الثانية ضمن المجرى نفسه وتتلقى بدورها دفع الرياح, قارن الشكل(3-1) الذي يبين مقطع أفقي في دوار سافونيوس, / 2, 6 /.



الشكل(3-1) مقطع أفقي في دوار سافونيوس

تتبع قوة دفع الرياح F_{Ds} للسرعة النسبية عند مركز نصف الاسطوانة. حيث تعرف السرعة النسبية لدوار سافونيوس على أنها الفرق بين سرعة تيار الهواء والسرعة المحيطية عند مركز نصف الاسطوانة التي تتلقى دفع الرياح. وتعطى السرعة النسبية بحسب / 6 / بالعلاقة التالية:

$$V_{rs} = V - \omega r_s \Rightarrow$$

$$V_{rs} = V\left(1 - \frac{\omega r_s}{V}\right) \Rightarrow$$

$$V_{rs} = V\left(1 - \lambda_s\right) \quad \text{..} (1-3)$$

تمثل λ_s نسبة السرعة المحيطية لدوار سافونيوس [/], وهي النسبة بين السرعة المحيطية عند مركز نصف الاسطوانة وسرعة التيار الحر للهواء.

$$\lambda_s = \frac{\omega r_s}{V} \quad ....(2-3)$$

حيث أن: V_{rs} هي السرعة النسبية لدوار سافونيوس [m/sec] .

ω هي السرعة الزاوية للدوار [rad/sec] .

r_s هو بعد مركز نصف اسطوانة دوار سافونيوس عن مركز الدوران[m].

فتعطى بالتالي قوة الدفع المؤثرة على نصف الاسطوانة بحسب المرجع / 6 / بالعلاقة:

$$F_{D_s} = C_{Ds}\,[0.5\,\rho\,(V - \omega r_s)^2 A_s] \quad ....(3-3)$$

حيث أن : A_s هي مساحة نصف الاسطوانة المواجهة للرياح. فتكون بالتالي مساحة سطح دوار سافونيوس المواجه للرياح هو($2A_s$-s.h_s) [m^2].

C_{Ds} هو معامل الدفع لنصف الاسطوانة ويقدر على أنه 2.2 [/] .

F_{Ds} : هي قوة دفع الرياح الــمؤثرة عند منتصــف الاسطــوانة التي تتلقى الدفع [N].

s: هو البعد الداخلي لنهايتي نصفي الاسطوانة المشكلتين لدوار سافونيوس (مسافة التداخل) [m].

h_s: ارتفاع دوار سافونيوس [m].

فتكون الاستطاعة الناتجة من تأثير قوة الدفع على دوار سافونيوس :

$$P_S = C_{D_s}\,[0.5\,\rho A_s\,(V - \omega r_s)^2\,]\omega r_s \Rightarrow$$

$$P_S = (\rho A_s V^3)[0.5 C_{D_s}\,\lambda_s\,(1-\lambda_s)^2\,] \quad ....(4-3)$$

حيث أن: P_s هي الاستطاعة المولدة من دوار سافونيوس [W].

وبالاعتماد على العلاقة (1-1) يعرف معامل الاستطاعة C_{ps} لدوار سافونيوس بأنه نسبة الاستطاعة الناتجة من الدوار إلى استطاعة الرياح المتوفرة ويعطى بحالة عدم وجود مسافة تداخل بين نصفي الاسطوانتين بحسب / 6 / بالعلاقة

التالية:

$$C_{p_s} = 0.5\, C_{D_s}\, \lambda_s\, (1-\lambda_s)^2 \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots (5-3)$$

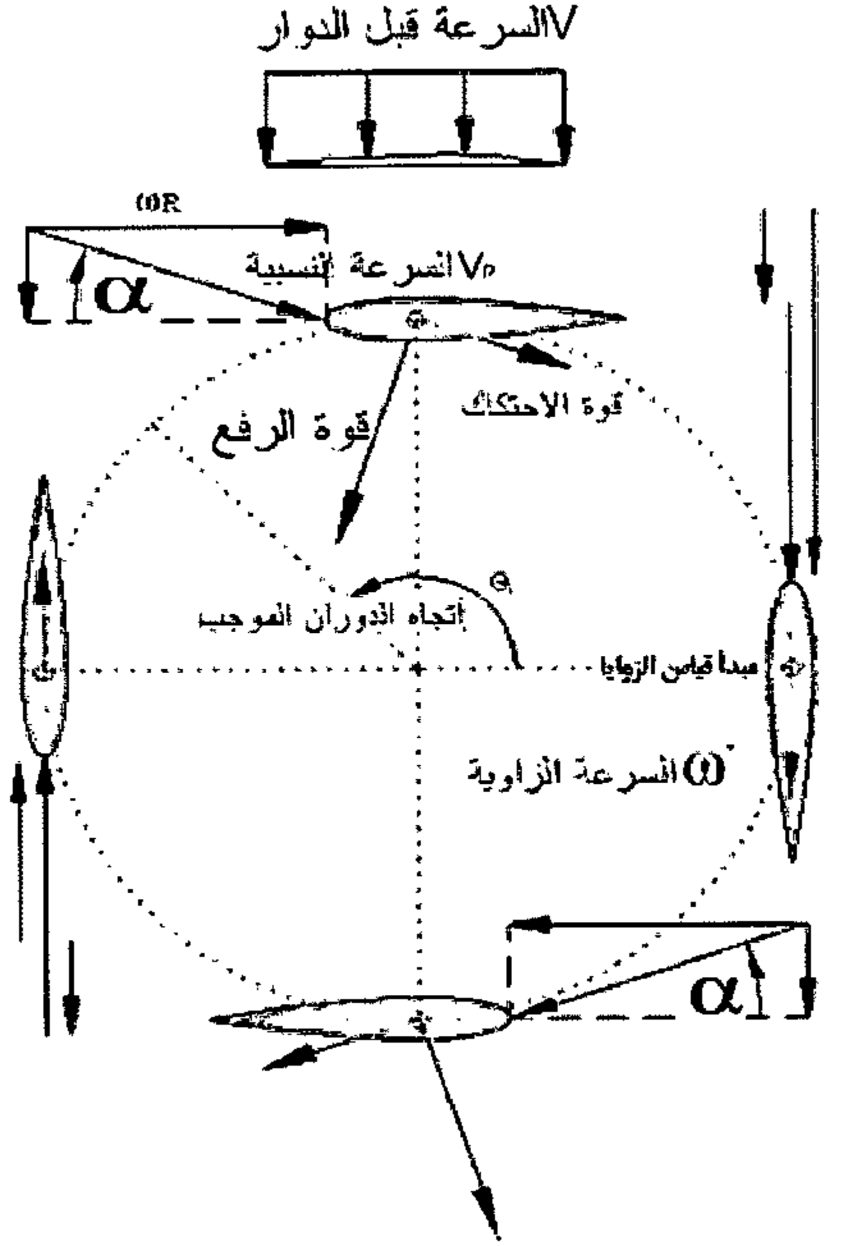
حيث أن : C_{ps} هو معامل الاستطاعة لدوار سافونيوس [/].

3-2- تحليل أداء دوار داريوس:

3-2-1 مبدأ عمل دوار داريوس:

يسهّل الشكل(3-2) فهم مبدأ عمل دوار داريوس, فباعتبار وجود تيار هواء مستقر يتجه نحو الدوار نسميه (التيار الحر) وبفرض أن سرعته ثابتة وهي سرعة التيار الحر V وإذا كانت ريشات الدوار تدور بسرعة محيطية ωR(حيث أن R هو نصف قطر دوار داريوس [m]) فإن هذه الريشات ستعيق بدورانها تيار الهواء الحر وستجعله يتباطأ قليلاً قبيل الدوار (أي قبيل محيط الدائرة التي ترسمها الريشة في منطقة تواجد الريشة) لتصبح سرعته V' هذه السرعة التي سيدخل بها تيار الهواء ضمن الدوار وستتشكل بذلك السرعة النسبية V_R الناتجة من تحصيل السرعة المحيطية للريشات مع سرعة التيار قبيل الدوار, حيث سميت بالسرعة النسبية لأنها منسوبة لمراقب يتحرك مع الريشة وليس لمراقب خارجي يقف ساكناً بعيداً عن الدوار, حينها ستقطع ريشات الدوار تيار الهواء الحر بزاوية هجوم α (هي الزاوية المحصورة بين شعاع السرعة المحيطية للريشة ωR وشعاع السرعة النسبية V_R في مثلث السرعة المرسوم عند مقدمة مقطع الريشة الانسيابي [rad]), حيث تعتمد زاوية الهجوم هذه على وضعية الريشة في مستوي الدوران وستنشأ نتيجة لجولان الهواء حول مقطع الريشة قوى الرفع الآيروديناميكية ذات عزم الدوران الموجب المساعد على الحركة, إضافة إلى قوى الاحتكاك ذات عزم الدوران السالب والمعيق للحركة, كما يمكن رسم مثلثات السرعة لمقطع الريشة الانسيابي عند مواضع زاوية مختلفة للريشة وهذا ما يوضحه الشكل(3-2) أيضاً. بالأخذ بالاعتبار مبدأ قياس الزوايا الذي سيتحدد على أساسه الوضعية الزاوية للريشة من خلال الزاوية θ يلاحظ أنه عندما تكون

الريشة في الوضعية الزاوية(0°) أو(180°) تكون قوى الرفع معدومة فتؤثر فقط قوى الاحتكاك.أما في الوضعيات الزاوية(90°) أو(270°) يظهر عزم قوى الرفع الموجب فإذا كانت بالمحصلة عزم قوى الرفع الموجب أكبر من عزم قوى الاحتكاك السالب سيتسارع دوران الدوار بالاتجاه المبين بالشكل(3-2) حتى يصل لسرعة العمل الاسمية وإلا فإن الغلبة ستكون لعزم قوى الاحتكاك السالب مما سيعيق الدوران.



الشكل(3-2) مثلثات السرعة المتشكلة عند وضعيات مختلفة للريشة

أي أن قوى الرفع والاحتكاك المؤثرة على الريشة تختلف باختلاف الوضعية الزاوية للريشة في مستوي الدوران الأفقي من جهة وباختلاف سرعة واتجاه هبوب الرياح من جهة أخرى وبالتالي يمكن أن يقلع الدوار مباشرة بشكل مستقر, أو من الممكن أن يتذبذب عند الإقلاع وهذا يعني بأن عزم إقلاع دوار داريوس قد يكون غير كافٍ للانتقال بالدوار إلى مرحلة العمل المستقرة عند سرعة الدوران الاسمية, حيث تساهم قوى الاحتكاك المؤثرة على الشفرات في تقليل هذا العزم وبناءً عليه قد يحتاج دوار داريوس لشكل من المساعدة عند الإقلاع لإيصاله إلى سرعة دوران مناسبة لعمله بشكل مستقر قدر الإمكان ليتابع دورانه بشكل ذاتي, / 6, 8, 9, 10 /.

3-2- 2- معالم الأداء لدوار داريوس:

تعتبر نسبة السرعة المحيطية ومعامل الاستطاعة ومعامل العزم من أهم المعالم المعبرة عن أداء دوار داريوس وفيما يلي توضيح لهذه المعالم (Parameters):

- نسبة السرعة المحيطية لدوار داريوس tsr (ويمكن أن يرمز لها في بعض المراجع أيضاً λ_d) [/], فتعبر عن النسبة بين السرعة المحيطية للريشات وسرعة التيار الحر وتعطى بحسب / 2, 6, 8 / بالعلاقة التالية:

$$tsr = \frac{\omega R}{V} \quad \text{..........} (6-3)$$

- يعرف معامل الاستطاعة C_p [/], على أنه نسبة الاستطاعة المولدة من دوار داريوس P إلى استطاعة التيار الحر P_{wind} ويعبر عنه بحسب / 2, 6, 8 / بالعلاقة الرياضية التالية:

$$C_P = \frac{P}{P_{wind}} = \frac{P}{0.5 \rho A V^3} \quad \text{..........} (7-3)$$

حيث أن: $A = h.D$ هي مساحة مقطع دوار داريوس المواجه للرياح $[m^2]$.

D هو قطر دوار داريوس [m].

h هو ارتفاع دوار داريوس (طول الريشة) [m].

- أما معامل العزم C_t [/], فهو النسبة بين عزم محور الدوار الشاقولي وعزم تيار الهواء الحر ويعطى بالعلاقة التالية, / 2, 6, 8 /:

$$C_t = \frac{Q_{axis}}{Q_{wind}} = \frac{Q_{axis}}{0.5\rho A R V^2} \quad \text{...}(8\text{–}3)$$

حيث أن: Q_{axis} هو عزم محور الدوار الشاقولي [m.N].

Q_{wind} هو عزم تيار الهواء الحر [m.N].

يمكن تحديد العلاقة بين المعالم (Parameters) الأساسية لدوار داريوس انطلاقاً من علاقة معامل العزم بضرب البسط والمقام بالسرعة الزاوية للدوار وسرعة التيار الحر للهواء:

$$C_t = \frac{Q_{axis}}{0.5\rho A R V^2} \cdot \frac{\omega}{\frac{\omega V}{V}} = \frac{Q_{axis}.\omega}{0.5\rho A V^3 . \frac{\omega R}{V}} = \frac{P}{0.5\rho A V^3 (tsr)}$$

$$\Rightarrow C_t = \frac{C_P}{tsr} \quad \text{.........................}(9\text{–}3)$$

تتعلق الاستطاعة المولدة من دوار داريوس بشكل أساسي بسرعة تيار الهواء الحر وسرعة دوران الدوار لذا يعبر عن أداء الدوار بمنحني يبين علاقة تغير معامل الاستطاعة مع تغير نسبة السرعة المحيطية للدوار إضافة إلى المنحني الذي يبين علاقة تغير معامل العزم مع تغير نسبة السرعة المحيطية أيضاً, / 2, 6, 8 /.

3–2–3– تدفق الرياح قبل وبعد الدوار الريحي:

يعيق دوار داريوس تيار الهواء عند وصوله إليه فيواجه تيار الهواء نقصاناً بسرعته عند حدود مدخل الدوار (قبيل الدوار في مكان تواجد الريشة) بالنسبة لسرعة التيار الحر قبل الدوار بمسافة معينة فتصبح سرعة التيار ضمن الدوار V' , ونتيجة تقديم تيار الهواء جزءاً من طاقته الحركية لتتحول إلى طاقة حركية دورانية للدوار يخرج التيار من الدوار بسرعة أقل من سابقتيها وهي

سرعة تيار الهواء بعد الدوار V'' ويبرهن الاستنتاج الرياضي التالي على أن سرعة الرياح قبيل الدوار V' هو متوسط حسابي لسرعة التيار الحر قبل الدوار V وسرعة التيار بعد الدوار V'' , فبتطبيق معادلة برنولي بشكلها التفاضلي بين أي مقطعين من جريان ما, المقطع رقم (1) والمقطع رقم (2), يتم الحصول على العلاقة التالية:

$$\rho V\ dV\ = dP \quad \text{...} (10-3)$$

بإجراء التكامل للطرفين بين المقطعين (1) و(2) يمكن الحصول على معادلة برنولي التالية:

$$\rho \frac{V_1 + V_2}{2}(V_1 - V_2) = P_1 - P_2 \quad \text{...............................} (11-3)$$

حيث أن: P_1, P_2 هما الضغط عند المقطعين رقم (1) ورقم (2) [Pa].

V_1, V_2 هما سرعة الجريان عند المقطعين رقم(1) ورقم(2) [m/sec].

بتطبيق هذه العلاقة على التيار قبل الدوار P_{up} والتيار قبيل الدوار P_{in} يكون:

$$\rho \frac{V + V'}{2}(V - V') = P_{up} - P_{in} \quad \text{.................................} (12-3)$$

وبتطبيق معادلة برنولي على التيار قبيل الدوار P_{in} والتيار بعد الدوار P_{down} على اعتبار أن الضغط ضمن الدوار يبقى ثابتاً نحصل على العلاقة التالية:

$$\rho \frac{V' + V''}{2}(V' - V'') = P_{in} - P_{down} \quad \text{...........................} (13-3)$$

بتطبيق معادلة كمية الحركة بين مقطعين قبل الدوار وبعد الدوار يمكن كتابة العلاقة التالية:

$$\rho V'(V - V'') = P_{up} - P_{down} \quad \text{.....................................} (14-3)$$

بجمع معادلتي برنولي للتيارين قبل وبعد العنفة يكون:

$$\rho(\frac{V+V'}{2})(V-V')+\rho(\frac{V'+V''}{2})(V'-V'')=P_{up}-P_{down}$$

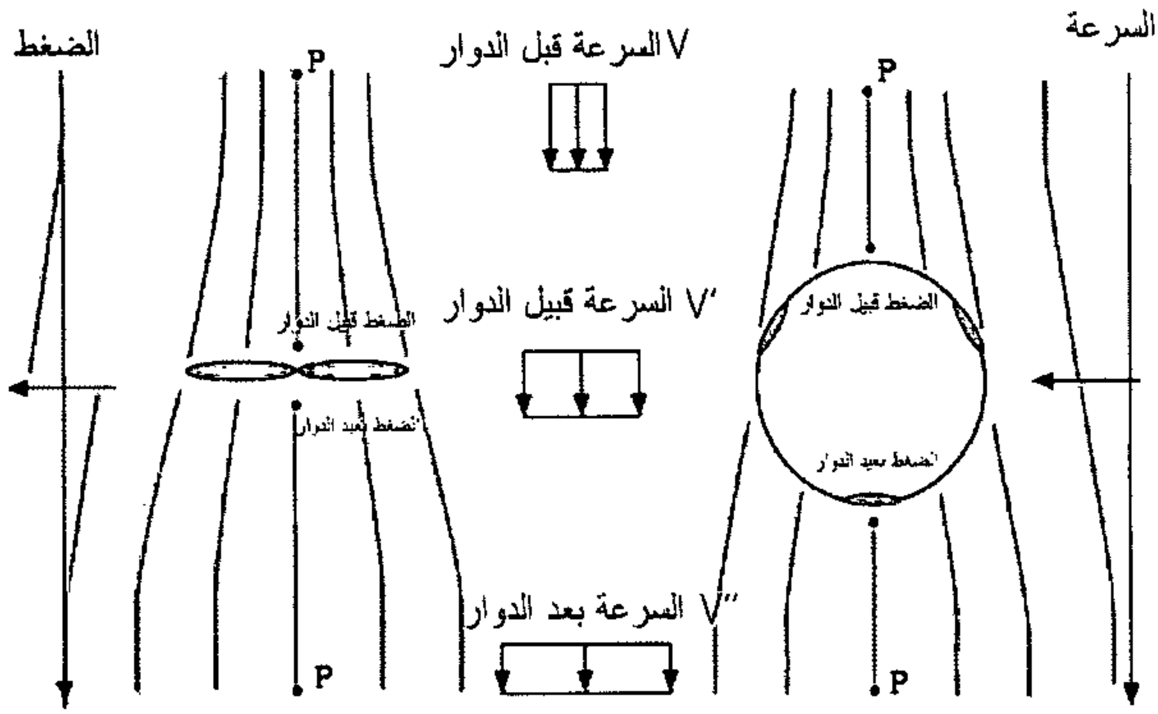
$$\rho(\frac{V^2-V'^2}{2})+\rho(\frac{V'^2-V''^2}{2})=P_{up}-P_{down}$$

$$\rho(\frac{V+V''}{2})(V-V'')=P_{up}-P_{down} \quad ....(15-3)$$

بمطابقة العلاقة الأخيرة مع معادلة كمية الحركة في العلاقة(3-14) نجد:

$$V'=\frac{V+V''}{2} \quad ....(16-3)$$

أي أن مقدار نقصان السرعة قبل الدوار يساوي النقصان الحاصل بالسرعة بعد الدوار, وعند دراسة الضغط نلاحظ ارتفاع للضغط قبيل العنفة أما بعيدها يلاحظ ظهور قيمة سالبة للضغط تساوي بالقيمة المطلقة قيمة الضغط قبيل العنفة, وهذا ما يبينه الشكل (3-3), / 6, 8 /.



الشكل (3-3) تغير سرعة الجريان والضغط نتيجة عبور الرياح لدوار ريحي

3-2-4- البرهان على حدود بيتز:

تعطى استطاعة الرياح المتوفرة في واحدة المساحة أو ما يسمى بالاستطاعة النوعية للرياح بالعلاقة التالية, / 2, 6, 8 /:

$$\frac{P_{wind}}{A} = 0.5\,\rho V^{3} \quad \text{...}(17-3)$$

استطاع بيتز البرهان بأنه لا يمكن للدوار الريحي المثالي استخلاص أكثر من (59%) من استطاعة التيار الريحي. فبدلاً من النظر إلى مردود الدوار الريحي, نظر بيتز إلى كمية الاستطاعة التي يمكن أن تقدمها الرياح للدوار عند ثبات سرعتها قبيل الدوار.

يعيق الدوار الريحي – كما ذُكر سابقاً – تيار الهواء قبيل وصوله إليه ولتبقى معادلة استمرارية الجريان وثبات التدفق عبر الدوار محققة فلن يستطيع الدوار استخلاص كامل طاقة جريان الرياح وإلا سيكون ذلك على حساب نقصان التدفق, أو بشكل آخر فإن تدفق الهواء عبر الدوار الريحي سيقل إذا كانت العنفة ستوقف تيار الهواء لتستخلص كامل طاقته, فيمكن للدوار أن يستخلص كامل طاقة الرياح فقط إذا كان التدفق منخفض جداً ولكي يبقى التدفق ثابتاً عبر الدوار فيجب ألا يستخلص بدوره إلا جزءاً من طاقة تيار الهواء ليسهل مرور الجريان عبره.

يظهر البرهان التالي النسبة العظمى للاستطاعة التي يمكن استخلاصها من تيار الهواء والبالغة (59%) من الاستطاعة المتوفرة فيه وذلك في حالة الدوار المثالي الذي يحقق الفرضيات التالية, / 6, 8 /:

1- الجريان دائم ومستمر لمائع متجانس غير قابل للانضغاط.

2- إهمال قوى الاحتكاك بين المائع والريشات.

3- عدد الريشات لا نهائي.

4- مقدار ثابت من قوى الدفع المؤثرة على كامل مساحة الدوار.

5- عدم وجود أثر دوامي خلف الدوار.

6- الضغط قبل الدوار و بعده يساويان قيمة الضغط الجوي المحيط بالدوار.

حيث يحسب الفقد بالطاقة الحركية للرياح ΔE والفقد بالاستطاعة الحركية ΔP بحسب / 2, 6, 8 / كما يلي:

$$\Delta E = 0.5\ m\ (V^2 - V''^2) \quad ......(18-3)$$

$$\Delta P = 0.5\ \dot{m}\ (V^2 - V''^2)$$

$$\Rightarrow \Delta P = 0.5\ \rho\ A\ V'\ (V^2 - V''^2)$$

$$\Rightarrow \Delta P = 0.5\ \rho\ A V'\ (V - V'')(V + V'') \quad ......(19-3)$$

حيث أن: m هي كتلة الهواء المار عبر المقطع [kg].

$\dot{m}$ هو التدفق الكتلي عبر المقطع [kg/sec].

وبما أن:

$$V' = \frac{V + V''}{2} \Rightarrow V - V'' = 2\ (V - V')$$

$$\Rightarrow \Delta P = 0.5\ \rho\ A\ V'\ (2\ (V - V')(2V')) \quad ......(20-3)$$

$$\Rightarrow C_p = \frac{0.5\ \rho\ A\ V'\ (2\ (V - V')(2V'))}{0.5\,\rho A V^3}$$

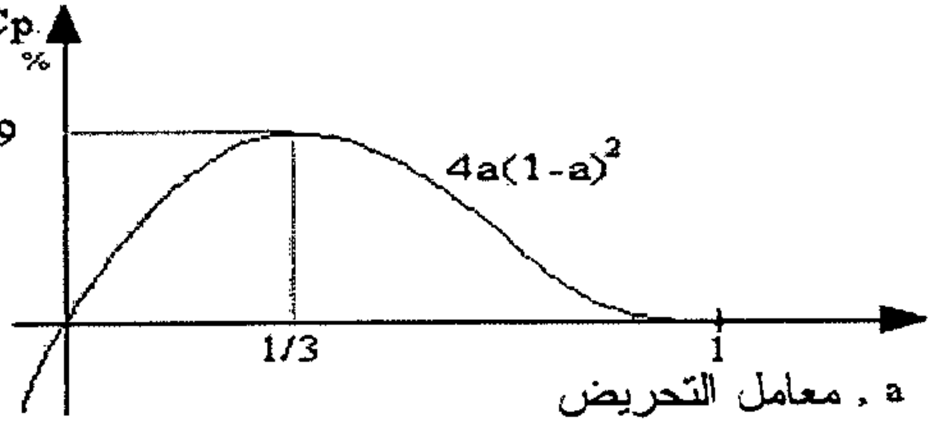
$$\Rightarrow C_p = 4\ (\frac{V'}{V})^2\ (1 - \frac{V'}{V}) \quad ......(21-3)$$

باعتبار المقدار $a = 1 - \frac{V'}{V}$ هو معامل التحريض, تصبح العلاقة بين معامل الاستطاعة ومعامل التحريض بالشكل التالي:

$$C_p = 4\ a\ (1 - a)^2 \quad ......(22-3)$$

بالتدقيق في علاقة معامل التحريض نلاحظ أنه يعبر عن النقصان النسبي في سرعة التيار الحر للهواء قبيل الدوار. برسم العلاقة بين معامل الاستطاعة ومعامل

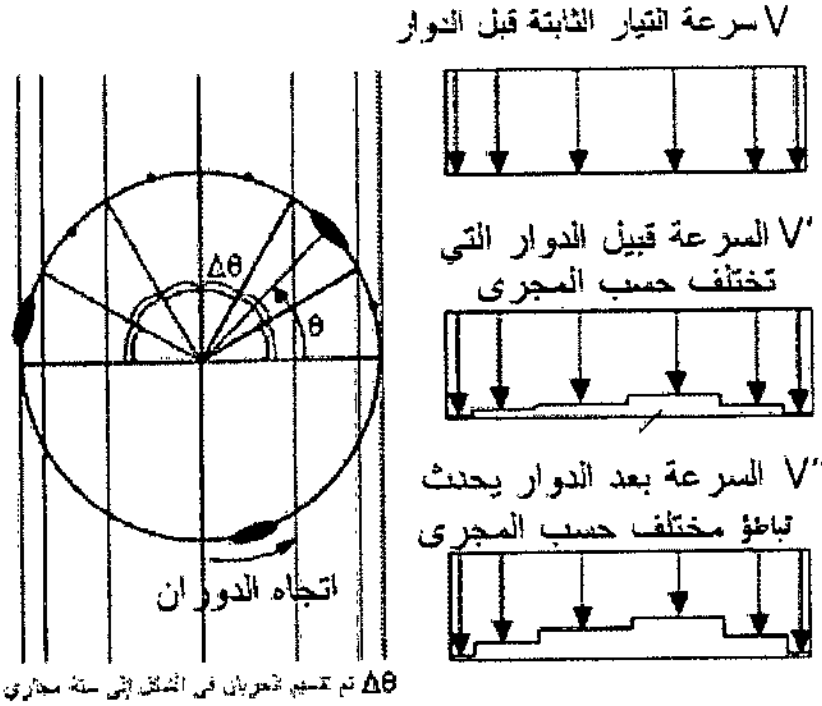
التحريض, الشكل(3-4), يتبين أن أعظم قيمة لمعامل الاستطاعة تبلغ (59%) عندما تكون قيمة معامل التحريض (a=1/3) حيث أن السرعة قبيل الدوار تكون أقل من سرعة التيار الحر للرياح قبل الدوار بـــ (33 %) والسرعة بعد العنفة تكون أقل من سرعة التيار الحر قبل العنفة بـــ (67 %), / 2, 6, 8 /.



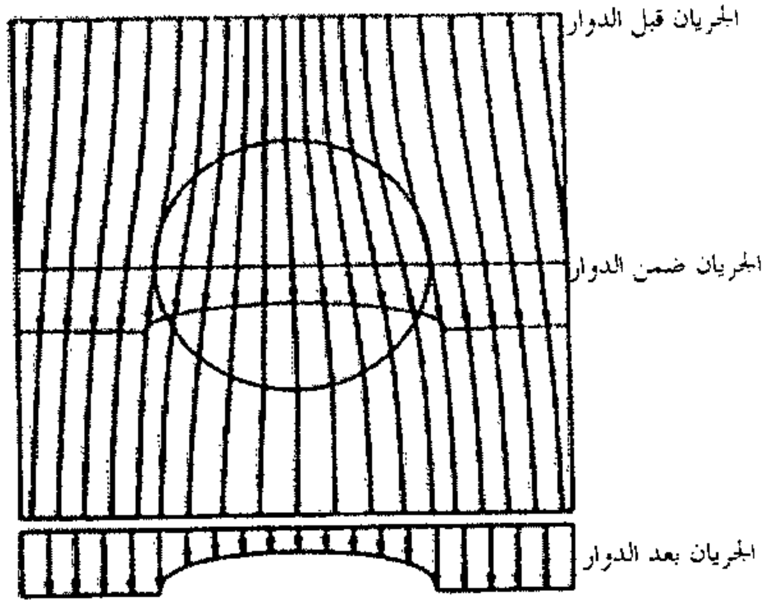
الشكل (3-4) علاقة معامل الاستطاعة مع معامل التحريض

3-2-5- تحليل أداء دوار داريوس بالاعتماد على النموذج المتعدد المجاري لكمية الحركية:

يقسّم الجريان عبر الدوار في هذه الطريقة إلى عدة مجاري, كما يوضح الشكل(3-5), يعتمد تحليل عمل الدوار وفق هذه الطريقة على افتراضين, الأول يعتمد على ثبات مساحة مقطع المجرى عبر الدوار في أثناء مرور التيار على عكس ما قد يتوقع نتيجة نقصان السرعة التي تتطلب زيادة في المقطع, أما الافتراض الثاني فيعتبر أن مجرى التيار يحافظ على استقامته ضمن الدوار على عكس ما قد يتوقع أيضاً إذ يعاني التيار من انحراف نتيجة اصطدامه بالريشات المتحركة ويوضح الشكل(3-6) الجريان الأكثر واقعية من الافتراضات المعتبرة في هذه الدراسة, لكن هذه الافتراضات تسهل عملية التحليل والنتائج التي سيتم الحصول عليها تعد ذات دقة مقبولة وجيدة جداً, / 2, 6, 8 /.



الشكل(3–5) الجريان الافتراضي ضمن دوار داريوس



الشكل (3–6) الجريان الواقعي ضمن دوار داريوس

تتجه الرياح نحو الدوار بسرعة ثابتة ومنتظمة V, فتبدأ سرعة التيار في كل مجرى بالتناقص بمعدلات مختلفة لدى وصولها إلى مسار دوران الريشة الدائري في مكان تواجد الريشة, وتصبح عندها سرعة التيار في المجرى V'. تحافظ

سرعة التيار في المجرى على قيمتها في أثناء عبوره للدوار مع أنه يتوقع تناقص السرعة أيضا ضمن الدوار. أما بعد مغادرة الدوار تبدأ السرعة بالتناقص وبمعدلات مختلفة أيضاً حتى تصل لسرعة مستقرة بعد الدوار V'' . يتساوى معدل نقصان السرعة قبل الدوار وبعده لكل مجرى, حيث يحدث في كل مجرى فقد مستمر في كمية الحركة لتيار الهواء عند مروره عبر الدوار ويحسب بمعلومية V' وتتم معرفة القوى الآيروديناميكية المؤثرة على الريشة عند موضع معين وعند عدد دورات معين من خلال بيانات معاملات الرفع والاحتكاك لمقطع الريشة الانسيابي وذلك إذا علمت قيمة V' أيضاً. وللحصول على دقة أكبر يُعتمد بالحساب على القوى الآيروديناميكية المؤثرة بنفس اتجاه الرياح والتي تساوي مقدار نقصان كمية الحركة حيث تسمى هذه القوى بقوى الدفع, / 2, 6, 8 /.

تؤثر في المجرى الواحد قوى الدفع عند مرور الريشات ضمن المجرى فقط (أي مرة من الجهة الأمامية للمجرى ومرة من الجهة الخلفية), أما في الوقت المتبقي يسود استقرار ضمن المجرى حيث تكون القوى فيه معدومة. تعتبر معادلة الاستمرار للجريان ضمن المجرى محققة بسبب اعتبار ثبات السرعة V' ضمن المجرى ذي المقطع الثابت بحسب الفرضيات. لا يحدث أي تغيير في كمية الحركة في الاتجاه المتعامد مع اتجاه الرياح ذلك لأن الريشة المارة بالجزء الأمامي للمجرى تواجه قوة متعامدة مع اتجاه الريح تعاكسها القوة التي تتعرض لها الريشة المارة بالجزء الخلفي للمجرى, / 2, 6, 8 /.

فيما يلي توضيح لمعادلات نموذج كمية الحركة المتعدد المجاري المخصص لدوار داريوس, حيث تم تبسيط سرعة الرياح ضمن الدوار بعزلها عن التغير مع أبعاد الدوار وتم اعتبارها ثابتة. وبحسب / 2, 6, 8 / يعطى الفقد في كمية الحركة بالعلاقة:

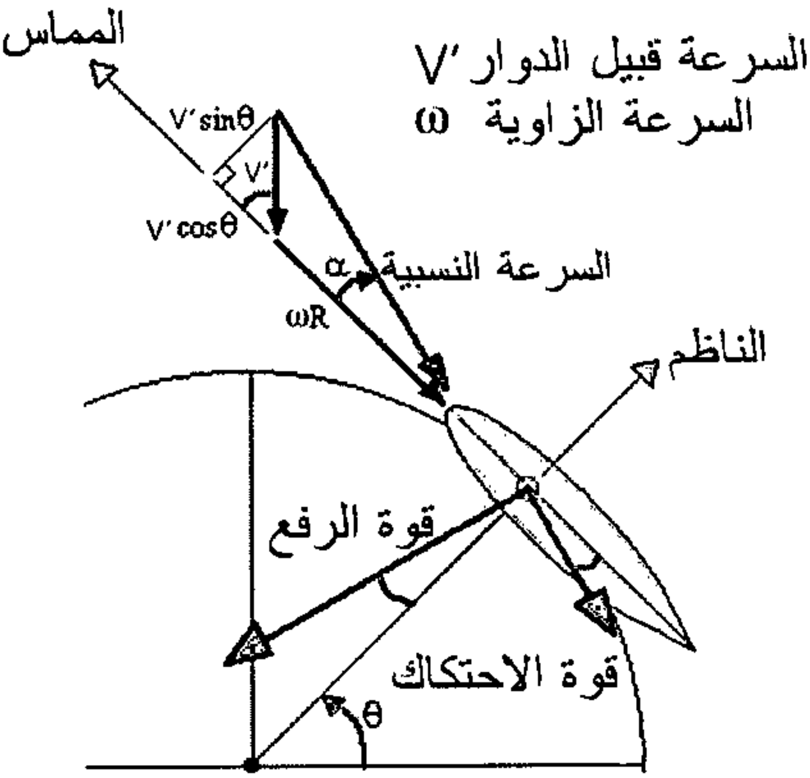
$$\Delta M = \rho\,(\,h\,R\,\Delta\theta \sin\theta\,)V'.2(\,V - V'\,)\ ....(23-3)$$

$$C_{thrust} = \frac{\rho(\,h\,R\ \Delta\theta\sin\theta\,)\,V'.2(V - V'\,)}{0.5\,\rho V^{2}\,(h\,R\,.\Delta\theta\sin\theta\,)} = 4\,\frac{V'}{V}\,(\,1 - \frac{V'}{V})$$

$$\Rightarrow C_{thrust} = 4a\,(\,1 - a\,)\ ....(24-3)$$

حيث أن: C_{thrust} هو معامل الدفع [/].

وتسمى العلاقة (3-24) بمعادلة كمية الحركة لتغير معامل الدفع مع معامل التحريض, حيث تظهر هذه العلاقة أن قيمة معامل الدفع العظمى تقابل القيمة (0.5) لمعامل التحريض وإذا ازدادت قيمة معامل التحريض عن هذه القيمة فسيبدأ معامل الدفع بالتناقص إلاّ أن التجارب العملية أثبتت عكس ذلك وهذا ما سيتم توضيحه لاحقاً في الفقرة (3-2-6).



الشكل (3-7) القوى المؤثرة على الريشة عند زاوية θ معينة

وبحسب / 2, 8, 9, 10 / تحسب السرعة النسبية من العلاقة التالية:

$$V_R=\sqrt{(V'\sin\theta)^2+(V'\cos\theta+\omega R)^2}\quad ....(25-3)$$

$$\frac{V_R}{V}=\sqrt{(\frac{V'}{V}\sin\theta)^2+(\frac{V'}{V}\cos\theta+\frac{\omega R}{V})^2}$$

$$\Rightarrow\frac{V_R}{V}=\sqrt{((1-a)\sin\theta)^2+((1-a)\cos\theta+tsr)^2}\quad ......(26-3)$$

حيث تسمى النسبة $\frac{V_R}{V}$ نسبة السرعة النسبية إلى سرعة التيار الحر [/].

وتعطى زاوية الهجوم بحسب / 2, 8, 9, 10 / بالعلاقة:

$$\tan\alpha=\frac{-V'\sin\theta}{V'\cos\theta+\omega R}=\frac{-\frac{V'}{V}\sin\theta}{\frac{V'}{V}\cos\theta+\frac{\omega R}{V}}$$

$$\alpha=\tan^{-1}\left(\frac{-(1-a)\sin\theta}{(1-a)\cos\theta+tsr}\right)\quad ....(27-3)$$

وتوضح العلاقات التالية معاملات القوى الناظمية والمماسية وذلك بحسب / 2, 8, 9, 10 /:

$$C_{norm}=-C_l\cos\alpha-C_d\sin\alpha\quad ....(28-3)$$

$$C_{\tan g}=C_l\sin\alpha-C_d\cos\alpha\quad ....(29-3)$$

حيث أن: C_l, C_d هي معاملات الرفع والاحتكاك على الترتيب لمقطع الريشة الانسيابي والتابعين لزاوية الهجوم[/].

C_{norm}, C_{tang} هي معاملات القوة الناظمية والقوة المماسية [/].

وبالتالي وبحسب / 2, 8, 9, 10 / تعطى قوة الدفع اللحظية عند زاوية θ للريشة:

$$T = 0.5\,\rho V_R^2 (h\,c)(-C_{norm}\sin\theta - C_{\tan g}\cos\theta) \quad ....(30-3)$$

حيث أن h هوارتفاع الريشة [m].

c هوطول الوتر الوسطي للريشة [m].

وبحسب / 2, 8, 9, 10 / يعطى معدل قيمة قوة الدفع المؤثرة على الريشات عند مرورها بالمجرى بالعلاقة التالية:

$$T_{av} = n.T.\frac{\Delta\theta}{2\pi}.2 \quad ....(31-3)$$

$$\Rightarrow C_{thrust} = \frac{T_{av}}{0.5\,\rho V^2\,(h\,R\,\Delta\theta\sin\theta)}$$

$$\Rightarrow C_{thrust} = (\frac{n\,c}{D})(\frac{V_R}{V})^2\,\frac{2}{\pi}\,(-C_{norm} - \frac{C_{\tan}}{\tan\theta}) \quad ....(32-3)$$

حيث أن: n هوعدد الريشات [/]

D هوقطر الدوار [m] .

n c / D هي قساوة الدوار وتعبر عن نسبة المساحة الفعلية لريشات الدوار على مساحة سطح الدوار المواجهة لتيار الرياح [/].

وتحدد قيمة معامل التحريض a بطريقة عددية, بحيث يتم فرض قيمة لهذا المعامل وبناءاً على هذه القيمة يتم حساب نسبة السرعة النسبية V_R/V وزاوية الهجوم ومعاملات القوى الناظمية والمماسية وبالتالي يصبح بالإمكان حساب معامل الدفع بحسب النموذج المتعدد المجاري. أما في المرحلة الثانية فيتم حساب معامل الدفع بناءً على الفقدان في كمية الحركة وإذا تساوى معاملي الدفع المحسوبين بطريقتين مختلفتين تكون قيمة معامل التحريض المفروضة صحيحة وإن لم تتطابق القيمتين نقوم بإعادة فرض قيمة جديدة لمعامل التحريض وهكذا على أن يحقق معامل التحريض المتراجحة التالية : $(0<a<0.5)$.

وتعطى قيمة العزم اللحظي الذي يؤثر على الريشة عندما تكون θ معينة بحسب

/ 2, 8, 9, 10 / بالعلاقات التالية:

$$Q = 0.5\,\rho V_R^2 (h\,c) C_{\tan g}\, R \quad ....(33-3)$$

$$Q_{av} = n.\frac{\sum_{i=1}^{2m} 0.5\,\rho V_R^2 (h\,c) C_{\tan g}\, R}{2\,m_t} \quad ....(34-3)$$

حيث أن Q هو العزم اللحظي المتولد من مرور الريشة ضمن المجرى [m.N].

Q_{av} هوالعزم الوسطي المؤثر على الدوار خلال دورة كاملة [m.N] .

m_t هو عدد المجاري [/].

وبما أن العزم يؤثر بشكل متناظر بالنسبة لمحور الدوران نجد أن:

$$Q_{av} = n\frac{\sum_{i=1}^{m} 0.5\,\rho V_R^2 (\,h\,c\,) C_{\tan g}\, R}{m_t} \quad ....(35-3)$$

$$C_t = \frac{Q_{av}}{0.5\,\rho V^2 (D\,h\,) R} = \frac{n\,c}{D}.\frac{\sum_{i=1}^{m} (\frac{V_R}{V})^2 C_{\tan g}}{m_t} \quad ......(36-3)$$

$$C_p = C_t .tsr \quad ....(37-3)$$

حيث أن: C_t هو معامل العزم [/].

C_p هو معامل الاستطاعة [/].

وبالتالي نكون قد حصـــلنا علـــى معالم (Parameters) أداء الدوار عند سرعة رياح معينة وسرعة دوران معينة.

3-2-6-معادلة غلارت التجريبية:

يقوم دوار أي عنفة ريحية بإبطاء تيار الرياح الوارد إليه وبذلك يستخلص جزءاً من طاقته الحركية وعلى العكس حيث تقوم المروحة بتسريع الهواء وتنقل جزءاً من طاقتها الحركية إليه ويعكس دوار داريوس في أثناء عمله كلا الحالتين حيث

يقوم بإبطاء تيار الهواء في مكان بينما يقوم الدوار بتسريع تيار الهواء في أماكن أخرى بعينها. تسرع ريشات دوار داريوس تيار الرياح عند المجرى الجانبي للرياح أي عندما يكون المقطع الانسيابي للريشة موازياً لتيار الرياح ويحدث ذلك عندما تكون الريشة في أحد الوضعين: (0°) و(180°).أما عندما لا تمر الريشات بإحدى هاتين الوضعيتين فإن دوار داريوس يلعب دور العنفة المبطئة لتيار الهواء ويكون هذا التباطؤ للتيار بأشد حالاته عندما تتواجد الريشات في وضع قريب من الوضعين: (90°) و(270°) ويزداد هذا التباطؤ بازدياد قساوة الدوار وازدياد نسبة سرعته المحيطية. إن معادلة الفقد في كمية الحركة بينت أن قوى الدفع تزداد بازدياد إبطاء تيار الرياح (أو بزيادة معامل التحريض) حتى يبلغ معامل التحريض القيمة (0.5), ثم تبدأ بعدها قوى الدفع بالتناقص, قارن الشكل(3–8). إلا أن ذلك غير منطقي إذ بينت التجربة ازدياد قوى الدفع باستمرار مع زيادة تباطؤ الرياح. إن المعطيات التي تم الحصول عليها من اختبار العنفات الريحية والمروحيات برهنت أن قوى الدفع تزداد باستمرار ازدياد معامل التحريض في الجريان المضطرب بدلا من تناقصها كما أظهرت معادلة كمية الحركة, / 2, 6, 8 /.

وقد بينت التجارب التي أجراها غلارت أن العلاقة رقم (3–24) المستنتجة بالاعتماد على الفقد في كمية الحركة تصف تغير معامل الدفع مع تغير معامل التحريض عندما يكون معامل التحريض ضمن المجال من (0) حتى (0.4) . أما عندما يكون معامل التحريض ضمن المجال من (0.4) حتى (1) وضع غلارت معادلته التجريبية مستنداً على النتائج التي حصل عليها والتي بينت ضمن تقريب معين أن العلاقة بين معامل الدفع ومعامل التحريض ستكون خطية وهي بحسب / 2, 6, 8 / على الشكل التالي:

$$C_{thrust} = \frac{26}{15}a + \frac{4}{15} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(38-3)$$

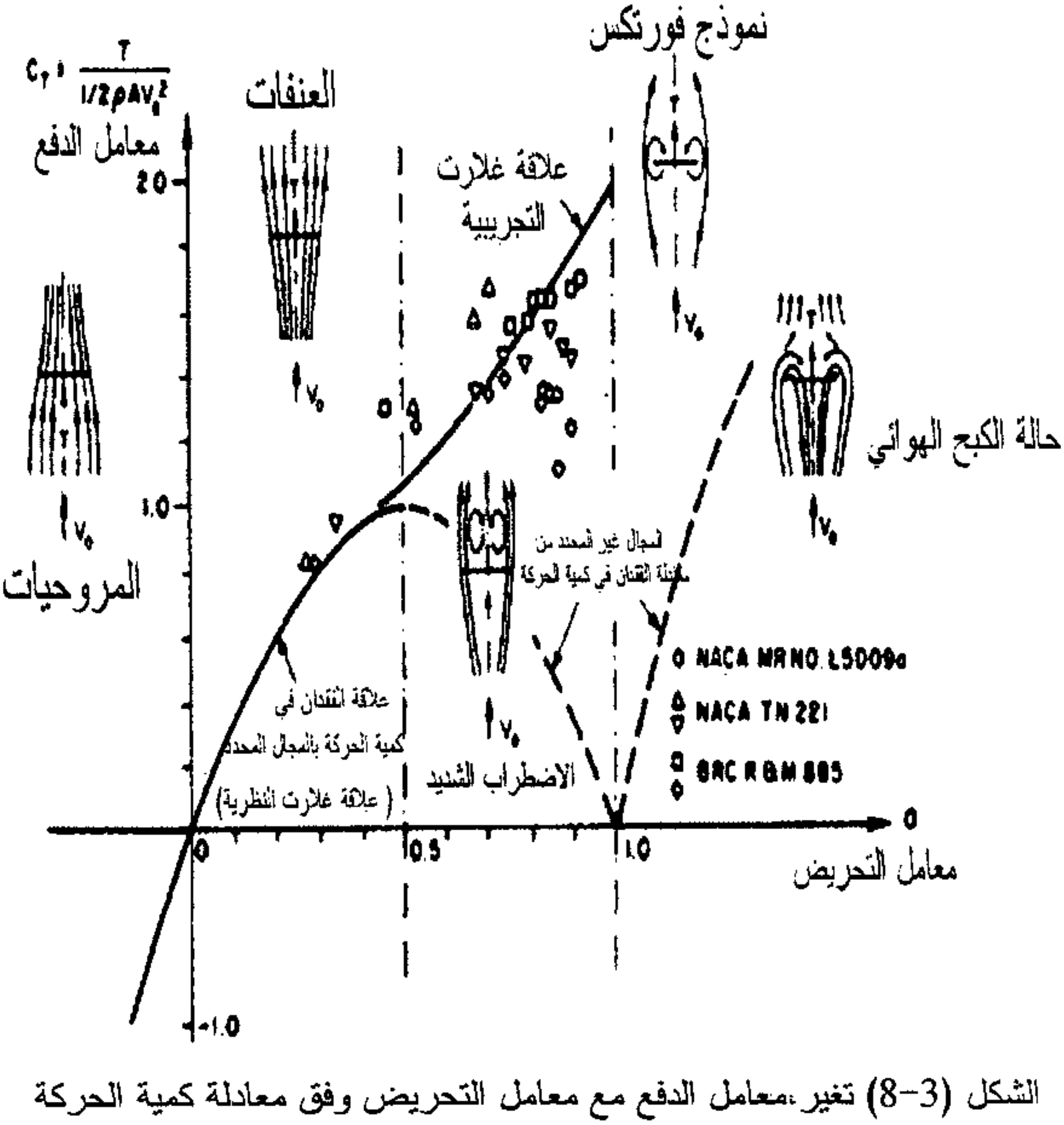
$$0.4 < a < 1$$

يبين الشكل(3–8) ثلاث مجالات مختلفة لقيم معامل التحريض:

– المجال الأول: عندما تكون a<0 يمثل مجال عمل المروحيات التي تزيد من سرعة الهواء.

– المجال الثاني: عندما تكون 1>a>0 يمثل عمل العنفات الريحية التي تقلل من سرعة الهواء.

المجال الثالث: عندما تكون a>1 يمثل حالة عمل المكابح الهوائية.



الشكل (3–8) تغير معامل الدفع مع معامل التحريض وفق معادلة كمية الحركة ووفق علاقة غلارت التجريبية

الفصل الرابع

النمذجة الحاسوبية لأداء كل من دوار سافونيوس ودوار داريوس

4-1- تعريف النموذج:

النموذج هو تمثيل رياضي لسلوك فيزيائي تقوم به جملة مادية مدروسة فيتم من خلال النموذج تحديد المقادير المؤثرة على هذا السلوك إضافة إلى تحديد طبيعة تأثير كل منها.

يتكون النموذج من العناصر الأساسية التالية:

1- المعطيات: وهي مجموعة المقادير المعلومة والمحددة سلفاً وتشمل الثوابت وقواعد البيانات ومواصفات الجملة المدروسة.

2- منظومة الحساب: وهي سلسلة من المعادلات الرياضية والأوامر البرمجية التي تصف العلاقة بين المعطيات والنواتج.

3- النواتج: وهي جملة المقادير المطلوب حسابها في النموذج وإظهارها على شكل ثوابت أو قواعد بيانات إضافة لتحديد كيفية تأثيرها على سلوك الجملة من خلال جملة من المنحنيات البيانية أو طرق إظهار أخرى.

تم إجراء النمذجة الحاسوبية لدراسة أداء كل من دوار سافونيوس ودوار داريوس بالاعتماد على برنامج MATLAB7 وهو اختصار للعبارة Matrix Laboratory وتعني مخبر المصفوفات. يتميز هذا البرنامج بتعامله مع جميع المتغيرات والمعطيات والمتحولات والنتائج على أنها مصفوفات مما يسهل عملية البرمجة ولا يحتاج بالتالي لتعريف للمقادير المستخدمة في البرنامج. ويؤمن هذا البرنامج بيئة متطورة لكتابة البرامج من خلالها بلغة البرمجة(C^{++}).

ويستخدم برنامج MATLAB7 في العديد من الغايات من أهمها:

1- إنجاز الحسابات.

2- تطوير الخوارزميات.

3- تحصيل المعطيات (أي الاستيفاء الرياضي).

4- النمذجة والمحاكاة.

5- تحليل المعطيات ومعالجتها وإظهار النتائج على شكل جداول أو منحنيات.

لقد صُمم برنامج MATLAB7 ليخدم بشكل أساسي علوم الاتصالات والكهرباء والتصميم الميكانيكي والاهتزازات الميكانيكية وعلم ديناميك الهواء وغيرها من الاختصاصات.

تم إنجاز النمذجة في هذا البحث لكل من دوار داريوس ودوار سافونيوس كل على حدى. لم تكن الغاية من هذه النمذجة إجراء مقارنة بين نتائج النمذجة والنتائج التي تم الحصول عليها من التجارب العملية على الدوار النموذج الذي تم تصنيعه واختباره وإنما كانت الغاية من النمذجة تحديد المتغيرات التي تؤثر على أداء كل دوار وفهم طريقة تأثيرها ليساعد ذلك في اختيار بعض المعالم الضرورية لتصميم وتصنيع الدوار النموذج. إضافة لما تقدمه هذه النمذجة من تسهيلات للباحثين والطلاب في المستقبل, / 4, 17 /.

4-2- نمذجة أداء دوار سافونيوس:

تم إجراء نمذجة حاسوبية لأداء دوار سافونيوس لا يحوي مسافة تداخل بين نصفي اسطوانتيه من خلال رابط برمجي وحيد يعتمد على العلاقة رقم (3-5) لتحديد قيم معامل الاستطاعة للدوار عند مجال لنسبة السرعة المحيطية يراوح بين القيمة (0) وحتى القيمة(1). يحتاج هذا الرابط البرمجي لتحديد معامل الدفع لدوار سافونيوس كمعطى والذي اعتبر مساوياً للقيمة(2.2) وينتج بالتالي من هذا الرابط البرمجي منحني يبين تغير معامل استطاعة الدوار مع تغير نسبة السرعة المحيطية. فيما يلي نص الرابط البرمجي لنمذجة أداء دوار سافونيوس, / 4, 6, 17 /:

```
function cp_sav=savsimu(cd)
tsrs=[0:0.01:1];
for i=1:1:numel(tsrs)
   cp(i)=0.5*cd*tsrs(i)*((1-tsrs(i)) ^2);
end
plot(tsrs,cp);
```

4-3- نمذجة أداء دوار داريوس:

تم إنجاز النمذجة الحاسوبية لدوار داريوس من خلال العلاقات الرياضية التي استخدمت في تحليل أداء الدوار بالاعتماد على نموذج كمية الحركة المتعدد المجاري (الواردة في الفقرتين(3-2-5), (3-2-6)). وتم إنشاء مجموعة من الروابط البرمجية الفرعية لإنجاز هذه النمذجة من خلال ربطها مع بعضها عبر رابط برمجي رئيس. تُظهر لنا هذه النمذجة منحنيات تغير معامل الاستطاعة ومعامل العزم مع نسبة السرعة المحيطية للدوار وذلك بإدخال بيانات المقطع الانسيابي المدروس المتمثلة بمعامل الرفع ومعامل الاحتكاك عند قيم معينة لزاوية الهجوم وعند قيمة معينة لرقم رينولدز علماً أن هذه البيانات محسوبة على اعتبار طول الريشة لا نهائي. كما يجب تحديد طول وتر المقطع الانسيابي وقطر الدوار وعدد الريشات المستخدم ويجب أيضاً تحديد مجال لقيم نسبة السرعة المحيطية التي سيتم إجراء النمذجة ضمنه.

4-3-1- المخطط الخوارزمي لنمذجة دوار داريوس:

تم بناء نمذجة أداء دوار داريوس بالاعتماد على مخطط خوارزمي يحوي فرعين أساسين لمعالجة المعطيات, قارن الملحق(أ), وهما:

<u>**الفرع الأول**</u>: يتكون من رابطين برمجيين. يتم في الرابط الأول ذو الرقم (1) إدخال جدول يحوي بيانات معاملات الرفع والاحتكاك عند قيم مختلفة لزوايا الهجوم وعند قيمة محددة لرقم رينولدز محسوبة على أساس طول لا نهائي للريشة, قارن الملحق(أ), يتم من خلال هذه البيانات حساب معاملات القوى المماسية والناظمية بالاعتماد على العلاقة(3-28) والعلاقة(3-29), تكون نتيجة

هذا الرابط البرمجي مصفوفة تحوي قيم معاملات القوى المماسية والناظمية عند قيم زوايا الهجوم الموجودة في جدول المعطيات الذي تم إدخاله للبرنامج, /4, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 /.

يتم في الرابط البرمجي الثاني من هذا الفرع في المخطط الخوارزمي إجراء استيفاء خطي لقيم معاملات القوى المماسية والقوى الناظمية لتحسب عند خطوات أصغر لقيم زاوية الهجوم وعند مجال واسع من قيم رقم رينولدز وذلك من خلال الرابط البرمجي رقم(2) الذي يأخذ نتيجة الرابط رقم(1) كمعطيات له ويتم على أساسها تقديم مصفوفتين الأولى تعطي قيم معامل القوة المماسية عند قيم مختلفة لكل من زاوية الهجوم ورقم رينولدز, أما المصفوفة الثانية فتعطي قيم معامل القوة الناظمية عند قيم مختلفة لزاوية الهجوم ورقم رينولدز.

<u>الفرع الثاني</u>: يتكون من ستة روابط برمجية فرعية أعطيت ترتيباً رقمياً من (3) وحتى (8). يتم تنفيذه هذه الروابط البرمجية الستة كسلسلة متلاحقة ومترابطة من خلال رابط برمجي رئيس نهائي أعطي الرقم(9) يتعامل المستخدم من خلاله مع الحاسب, كما يتم في أثناء جريان الحسابات في هذا الفرع تبادل معطيات مع الفرع الأول من الخوارزمية. فيما يلي شرح للروابط البرمجية المكونة لهذا الفرع, / 4, 6, 8, 9, 10, 17 /:

– الرابط البرمجي ذو الرقم(3): يتم من خلاله حساب نسبة السرعة النسبية إلى سرعة التيار الحر بالاعتماد على العلاقة(3-26) كما يتم حساب زاوية الهجوم بناء على العلاقة(3-27) وذلك عند وضعية زاوية معينة للريشة في مستوي الدوران وعند نسبة سرعة محيطية معينة وقيمة معينة لمعامل التحريض. كما يتم في هذا البرنامج حساب رقم رينولدز بالاعتماد على ثابت تجريبي.

– الرابط البرمجي ذو الرقم(4): يتم في هذا الرابط حساب معامل القوة المماسية والقوة الناظمية عند قيمة زاوية الهجوم ورقم رينولدز الناتجة في الرابط البرمجي ذو الرقم(3) وذلك بناءً على قيم المصفوفتين الناتجتين من الرابط البرمجي ذي الرقم(2).

- الرابط البرمجي ذو الرقم(5): تم جمع الرابطين البرمجيين ذوات الأرقام (3) و(4) في هذا الرابط ليتم حسابهما كخطوة واحدة.

-الرابط البرمجي ذو الرقم(6) : يتم فيه حساب معامل الدفع بالاعتماد على قيمة معامل التحريض وذلك إما بالاعتماد على العلاقة (3-24) أو(3-38) بحسب قيمة معامل الدفع.

- الرابط البرمجي ذو الرقم(7) : يتم فيه حساب معامل الدفع بالاعتماد على العلاقة (3-32) ويتم حساب الفرق بين القيميتين الأولى المحسوبة في الرابط البرمجي ذو الرقم (6) والثانية المحسوبة في هذا الرابط.

- الرابط البرمجي ذو الرقم(8) : يتم فرض قيمة لمعامل التحريض وحساب الفرق بقيم معامل الدفع المحسوبة في الرابط البرمجي ذو الرقم(7) فإذا كان الفارق أقل من قيمة معينة صغيرة يتم اعتماد هذه القيمة لحساب معامل الاستطاعة ومعامل العزم كمرحلة لاحقة في الرابط ذو الرقم(9) أويتم فرض قيمة أخرى, وهكذا يقوم بتكرار عملية فرض قيمة لمعامل التحريض حتى يصل لقيمة تحقق الشرط وذلك عند وضعية زاوية معينة للريشة في مستوي الدوران الأفقي.

- الرابط البرمجي ذو الرقم(9): هو الرابط البرمجي النهائي الذي يجمع البرامج السابقة من الرابط ذو الرقم(3) وحتى الرابط ذو الرقم(8) والذي يتعامل المستخدم مع الحاسب من خلاله, بحيث يتم إدخال المصفوفتين الناتجتين من الرابط البرمجي ذي الرقم(2) في الفرع الأول من المخطط الخوارزمي لهذا الرابط البرمجي كما يتم تحديد طول وتر الريشة وقطر الدوار وعدد الريشات ومجال قيم نسبة السرعة المحيطية التي سيتم إجراء النمذجة ضمنه ويقوم هذا البرنامج بحساب معامل الاستطاعة ومعامل العزم بالاعتماد على العلاقة(3-36) والعلاقة(3-37). ويتم إظهار منحنيات تبين تغير معامل الاستطاعة ومعامل العزم مع تغير قيم نسبة السرعة المحيطية. المخطط الخوارزمي المبسط الخاص بنمذجة أداء دوار داريوس مبين بالملحق(أ).

4-3-2- نصوص البرامج المكتوبة في محرر نصوص برنامج MATLAB7 لنمذجة دوار داريوس:

<u>برامج الفرع الأول</u>, / 4, 17 /:

الرابط البرمجي رقم(1):

```
function dataAoACTCN=findCTCN(dataAoACLCD);
AoA=dataAoACLCD(:,1);
CL=dataAoACLCD(:,2);
CD=dataAoACLCD(:,3);
CT=CL.*sin(AoA/180*pi)-CD.*cos(AoA/180*pi);
CN=-CL.*cos(AoA/180*pi)-CD.*sin(AoA/180*pi);
dataAoACTCN=[AoA CT CN];
```

الرابط البرمجي رقم(2):

```
Function…
[interpolatedCT,interpolatedCN]=makeinterpolatedCTCN(dat…
afile,Re);
AoAstep=0.1;
Restep=10e3;
dataAoACLCD=datafile;
dataAoACTCN=findCTCN(dataAoACLCD);
interpolatedAoA=[0:AoAstep:dataAoACLCD(end,1)];
CT1=interp1(dataAoACTCN(:,1),...
      dataAoACTCN(:,2),interpolatedAoA,'linear')';
CN1=interp1(dataAoACTCN(:,1),...
      dataAoACTCN(:,3),interpolatedAoA,'linear')';
CT(2,:)=CT1(:,1);
CN(2,:)=CN1(:,1);
interpolatedRe=[0:Restep:Re(end)];
interpolatedCT=interp1(Re,CT,interpolatedRe,'linear');
interpolatedCN=interp1(Re,CN,interpolatedRe,'linear');
plot(interpolatedAoA',interpolatedCT(end,:)');
figure;
plot(interpolatedAoA',interpolatedCN(end,:)');
```

برامج الفرع الثاني، / 4, 17 /:

الرابط البرمجي رقم(3): ٦٩١٢٤٦

```
function
[VR,VN,VT,AoA,Re]=findvelocitytriangle(angularposition,...
tsr,staticRe,a);
VN=(1-a)*sin(angularposition/180*pi);
VT=((1-a)*cos(angularposition/180*pi)+tsr);
VR=sqrt(VT^2+VN^2);
AoA=atan2(VN,VT)/pi*180;
Re=staticRe*VR;
```

الرابط البرمجي رقم(4):

```
function [CT,CN]...
   = findprofileparameters(dataCT,dataCN,Re,AoA);
global seriesAoA seriesRe;
CT=interp2(seriesAoA,seriesRe,dataCT,AoA,Re,'linear');
CN=interp2(seriesAoA,seriesRe,dataCN,AoA,Re,'linear');
if AoA<0
   CN=-CN;
End
```

الرابط البرمجي رقم(5):

```
function [VR,AoA,Re,CT,CN]...
   =findtubeparameters(dataCT,dataCN,staticRe,tsr,...
angularposition,a);
[VR,VN,VT,AoA,Re]=findvelocitytriangle(angularposition,tsr,s
taticRe,a);
[CT,CN]=findprofileparameters(dataCT,dataCN,Re,AoA);
```

الرابط البرمجي رقم(6):

```
function glauerttubethrust=findglauertthrust(a);
if a<0.4
   glauerttubethrust=4*a*(1-a);
else
   glauerttubethrust= 26/15*a + 4/15; end
```

الرابط البرمجي رقم(7):

```
function [VR,AoA,Re,thrustcofficient,CT,CN,deltathrust]...
=finddeltathrust(dataCT,dataCN,solidity,staticRe,tsr,...
angularposition,a);
[VR,AoA,Re,CT,CN]= ...
findtubeparameters(dataCT,dataCN,staticRe,tsr,...
angularposition,a);
firstthrust=findglauertthrust(a);
secondthrust=solidity*(VR)^2*2/pi*(-CN-...
CT/tan(angularposition/180*pi));
 thrustcofficient=secondthrust;
deltathrust= secondthrust-firstthrust;
```

الرابط البرمجي رقم(8):

```
function [ a,VR,AoA,Re,thrustcofficient,CT,CN]...
= checkinductionfactor(dataCT,dataCN,solidity,staticRe,tsr,...
angularposition);
global Atolerance Astart Aend;
Afirst=Astart;
Asecond=Aend;
[VR,AoA,Re,thrustcofficient,CT,CN,firstdelta]=...
finddeltathrust(dataCT,dataCN,solidity,staticRe,tsr,...
angularposition,Afirst);
[VR,AoA,Re,thrustcofficient,CT,CN,seconddelta]=...
finddeltathrust(dataCT,dataCN,solidity,staticRe,tsr,...
angularposition,Asecond);
if firstdelta*seconddelta<=0
   while(Asecond-Afirst)>Atolerance&...
(firstdelta*seconddelta)~=0
      Amiddle=(Afirst+Asecond)/2;
      [VR,AoA,Re,thrustcofficient,CT,CN,middledelta]...
         =finddeltathrust(dataCT,dataCN,solidity,staticRe,tsr,...
         angularposition,Amiddle);
      if firstdelta*middledelta<=0
         Asecond=Amiddle;
         seconddelta=middledelta;
```

```
      else
         Afirst=Amiddle;
         firstdelta=middledelta;
      end
   end
   if firstdelta==0
      a=Afirst;
   elseif seconddelta==0
      a=Asecond;
   else
      a=(Afirst+Asecond)/2;
   end
else
   a=Aend*2;
end
[VR,AoA,Re,thrustcofficient,CT,CN,deltathrust]...
=finddeltathrust(dataCT,dataCN,solidity,staticRe,tsr,...
angularposition,a);
```

الرابط البرمجي رقم(9):

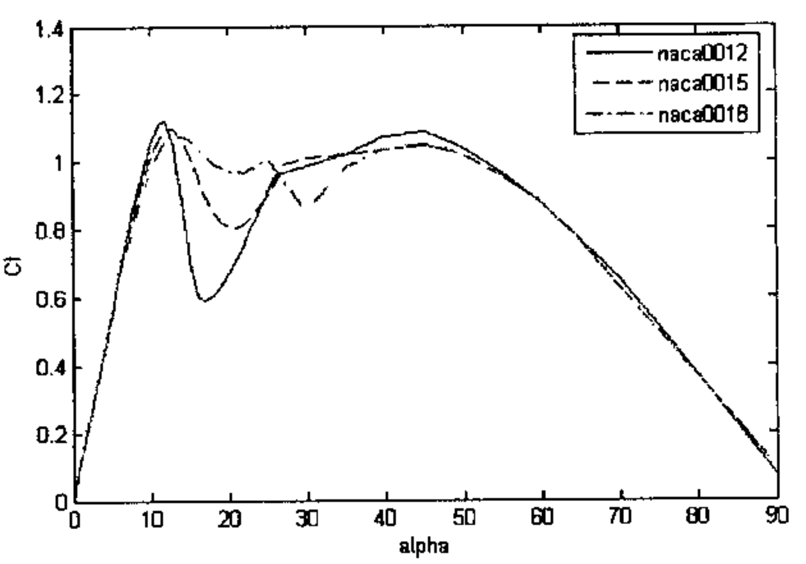
```
function tsr_Cp_Ct...
   =performancesimulation(CTrecords,CNrecords,N,C,D,tsr);
dataCT=CTrecords;
dataCN=CNrecords;
solidity=N*C/D;
staticRe=ones(size(tsr))*50000;
global Atolerance Astart Aend seriesAoA seriesRe;
Atolerance=0.01;Astart=-0.49;Aend=0.99;
seriesAoA=[0:0.1:0.1*(numel(dataCT(1,:))-1)];
seriesRe=[0:10000:10000*(numel(dataCN(:,1))-1)];
angularstep=5;
angularposition=[angularstep/2:angularstep:180]';
for i=1:1:length(tsr)
     for j=1:1:length(angularposition)
          [a,VR,AoA,Re,thrustcofficient,CT,CN]...
```

```
=checkinductionfactor(dataCT,dataCN,solidity,staticRe(i),...
          tsr(i),angularposition(j));
       VRvector(j,:)=VR;
       CTvector(j,:)=CT;
      end
   tubenumber=numel(angularposition);
   Ct(i)=solidity*sum(VRvector.^2.*CTvector)/tubenumber;
   Cp(i)=Ct(i)*tsr(i);
end
plot(tsr,Ct,'b');
figure;
plot(tsr,Cp,'r');
```

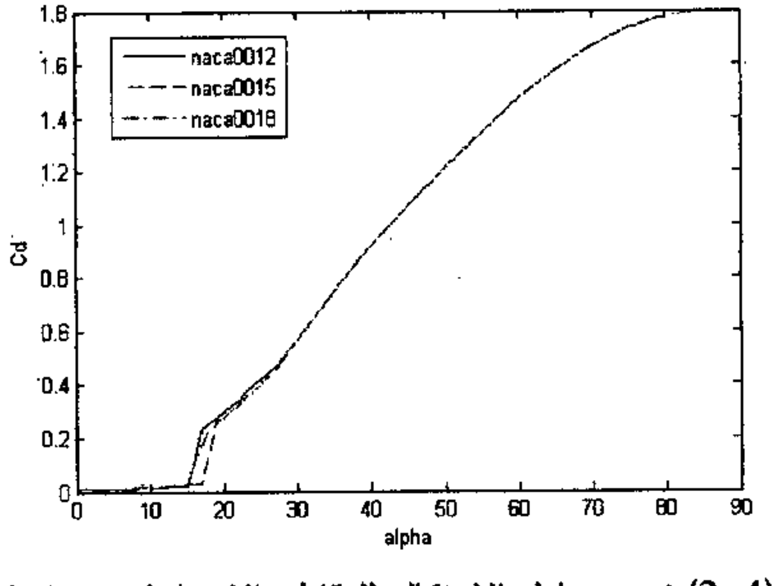
4-4- نتائج النمذجة الحاسوبية و مناقشتها:

تم إجراء النمذجة الحاسوبية لأداء دوار داريوس باعتماد البيانات الآيروديناميكية لثلاثة مقاطع انسيابية هي naca0012, naca0015, naca0018 , قارن الشكل(5-10), وتمت مقارنة الأداء لكل من هذه المقاطع في حالتين, الحالة الأولى عند عدد ريشات قدره (3) أي عند قيمة لقساوة الدوار تساوي (0.42) وعند عدد للريشات قدره (2) أي عند قيمة لقساوة الدوار تساوي(0.28), على اعتبار أن قطر الدوار (50 cm) وطول الوتر لمقطع الريشة الانسيابي (7 cm). كما تمت دراسة أداء دوار داريوس بشكل أساسي من خلال منحنيات تغير معامل الاستطاعة ومعامل العزم مع نسبة السرعة المحيطية وتم إظهار المنحنيات المعبرة عن تغير معاملات الرفع والاحتكاك لكل مقطع انسيابي مع زاوية الهجوم عند قيمة محددة لرقم رينولدز على اعتبار أن طول الريشة لا نهائي. كما تم أيضاً رسم المنحنيات المعبرة عن تغير معاملات القوى الناظمية والمماسية مع زاوية الهجوم عند قيمة محددة لرقم رينولدز وتم رسم المعاملين الأخيرين عند قيم مختلفة لرقم رينولدز بالنسبة للمقطع الانسيابي naca0012.

المجموعة الأولى من المنحنيات : تبين هذه المنحنيات تغير معاملات الرفع والاحتكاك مع زاوية الهجوم لكل مقطع من المقاطع الانسيابية المستخدمة في النمذجة. يلاحظ من هذه المنحنيات أن المقطع الانسيابي naca0012 يعاني من زاوية انهيار عند قيمة لزاوية الهجوم أصغر من القيمة التي يحدث عندها الانهيار في المقطعين الآخرين naca0015 و naca0018, كما يلاحظ تطابق شبه كامل بالنسبة لمعامل الاحتكاك بالنسبة للمقاطع المدروسة علماً أن هذه البيانات مأخوذة عند قيمة لرقم رينولدز قدرها (1000000). / 11, 12, 13, 14, 15, 16 /.

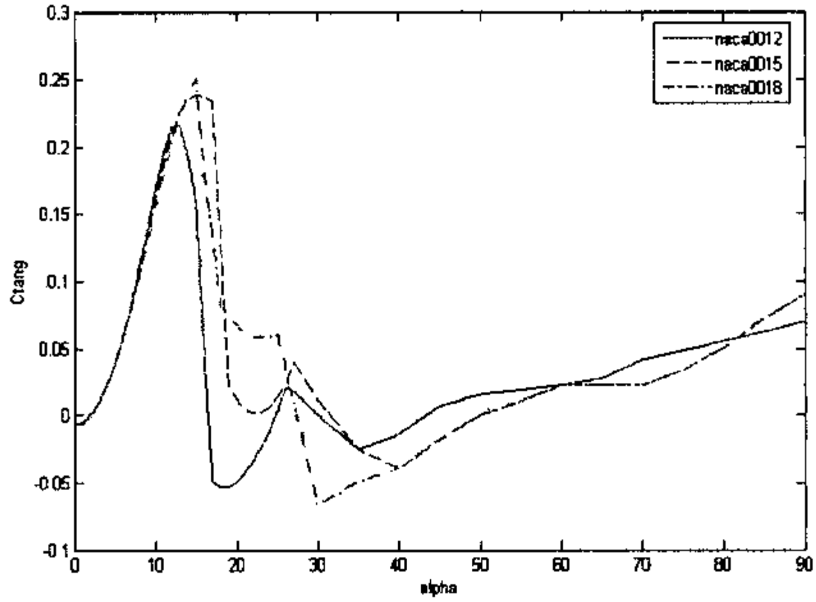


الشكل (4-1) تغير معامل الرفع للمقاطع الانسيابية مع زاوية الهجوم

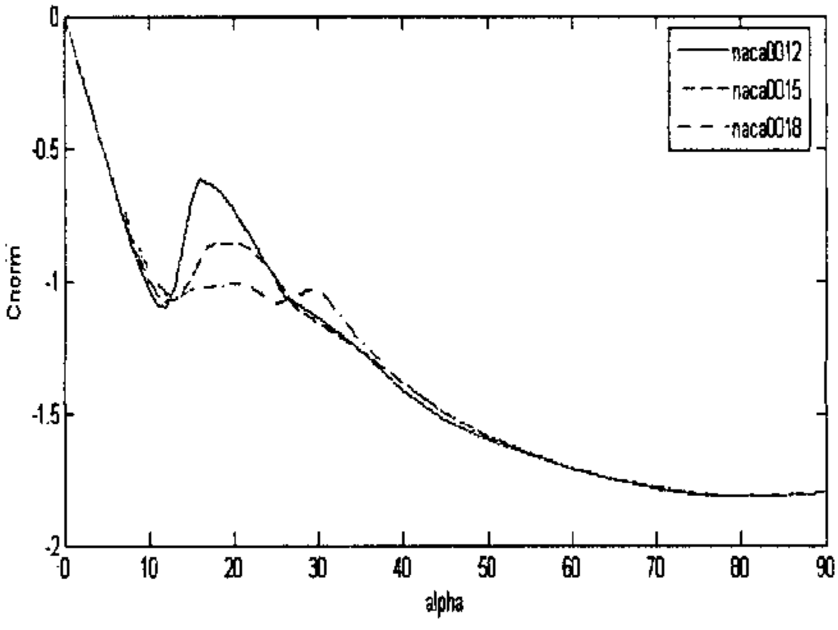


الشكل (4-2) تغير معامل الاحتكاك للمقاطع الانسيابية مع زاوية الهجوم

المجموعة الثانية من المنحنيات : تبين تغير معاملات القوى الناظمية والمماسية مع زاوية الهجوم محسوبة على أساس قيم معاملات الرفع والاحتكاك السابقة عند قيمة لرقم رينولدز مقدارها (1000000). حيث يلاحظ نقصاناً في قيمة معامل القوة المماسية في المقطع الانسيابي naca0012 عن المقطعين الآخرين عند زوايا هجوم صغيرة وهذا ما يتطابق مع بيانات معاملات الرفع والاحتكاك.

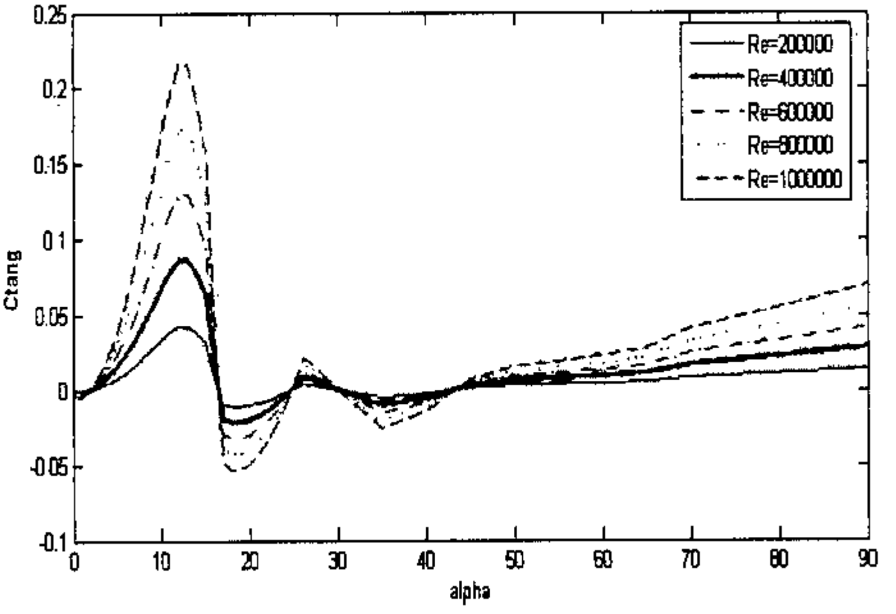


الشكل (4-3) تغير معامل القوة المماسية للمقاطع الانسيابية مع زاوية الهجوم

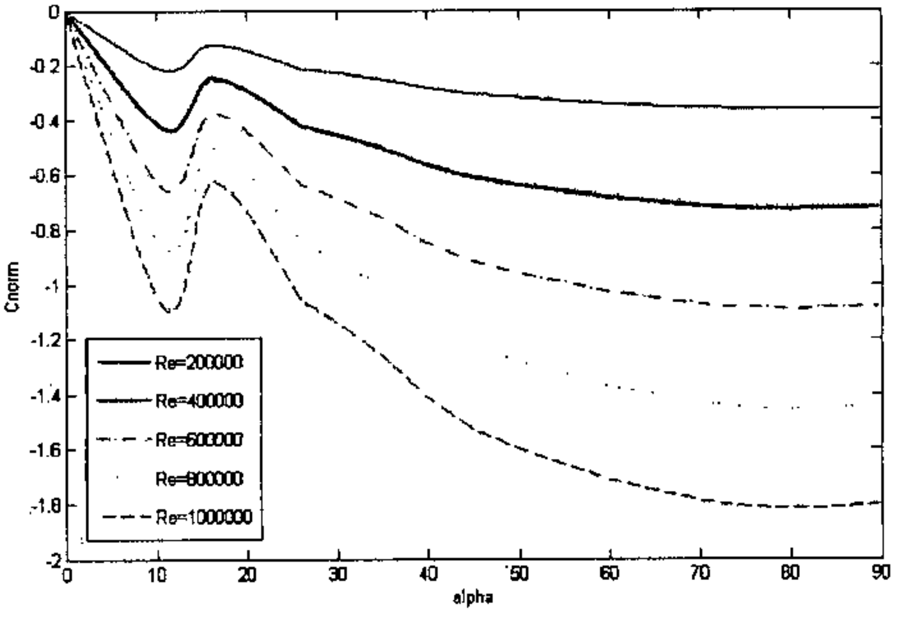


الشكل (4-4) تغير معامل القوة الناظمية للمقاطع الانسيابية مع زاوية الهجوم

وتبين المنحنيات التالية قيم معاملات القوى الناظمية والمماسية عند قيم مختلفة لأرقام رينولدز للمقطع الانسيابي naca0012 . حيث نلاحظ زيادة القيمة المطلقة لمعامل القوى المماسية والناظمية مع ازدياد قيمة رقم رينولدز.



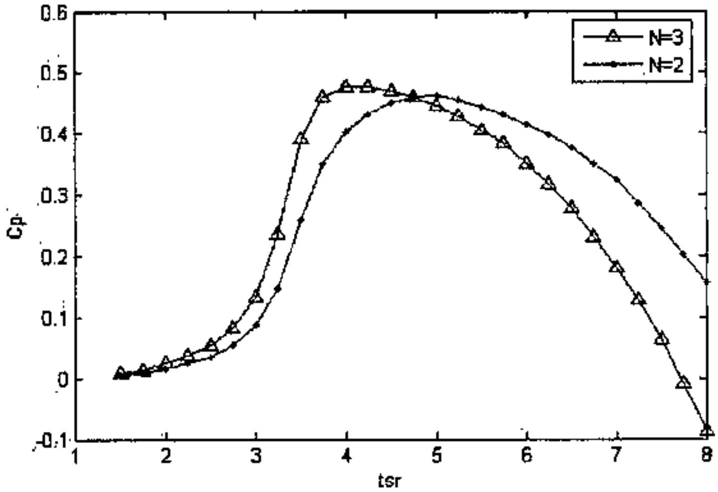
الشكل (4−5) تغير معامل القوة المماسية للمقطع naca0012 عند قيم مختلفة لرقم رينولدز



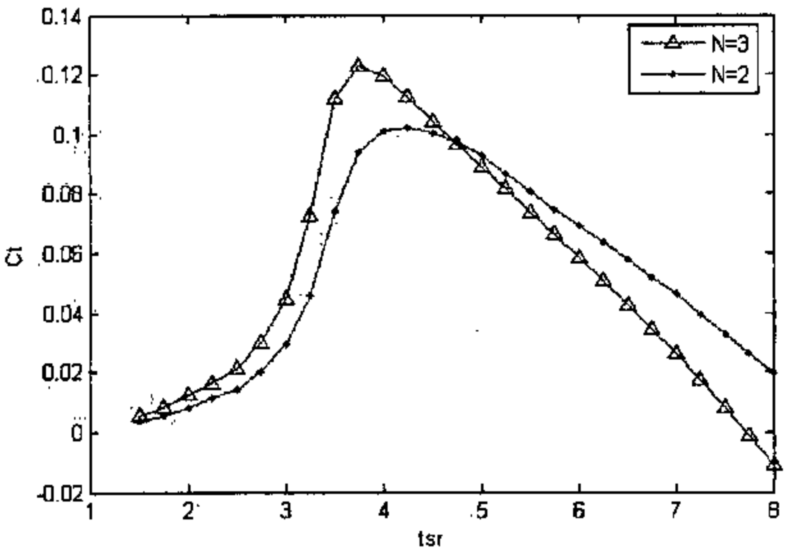
الشكل (4−6) تغير معامل القوة الناظمية للمقطع naca0012 عند قيم مختلفة لرقم رينولدز

<u>المجموعة الثالثة من المنحنيات:</u> تبين هذه المجموعة تأثير عدد الريشات المستخدم على منحنيات الأداء لكل مقطع من المقاطع الانسيابية المستخدمة في النمذجة, حيث يلاحظ زيادة في قيمة معامل الاستطاعة ومعامل العزم الأمثل في الدوار ذو الريشات الثلاث كما يلاحظ زيادة في عزم إقلاعه عن الدوار ذو الريشتين إلا أن الأخير يبدي استقراراً أكثر في أدائه مع ازدياد نسبة السرعة المحيطية.

- المقطع naca0012 :

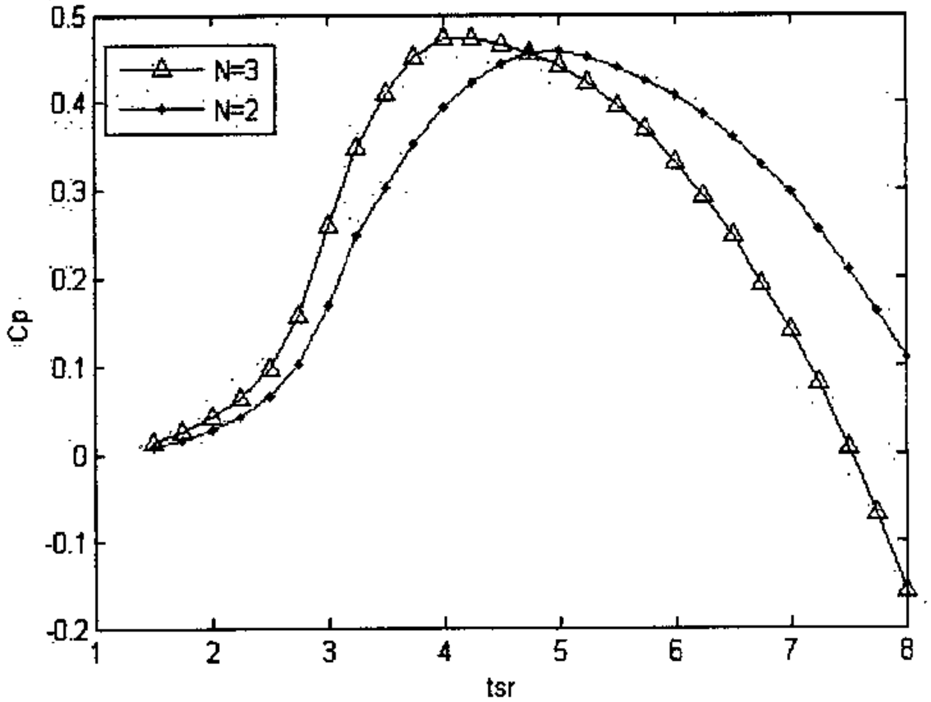


الشكل(4-7) منحني معامل الأستطاعة للمقطع naca0012 عند قيم مختلفة لعدد الريشات

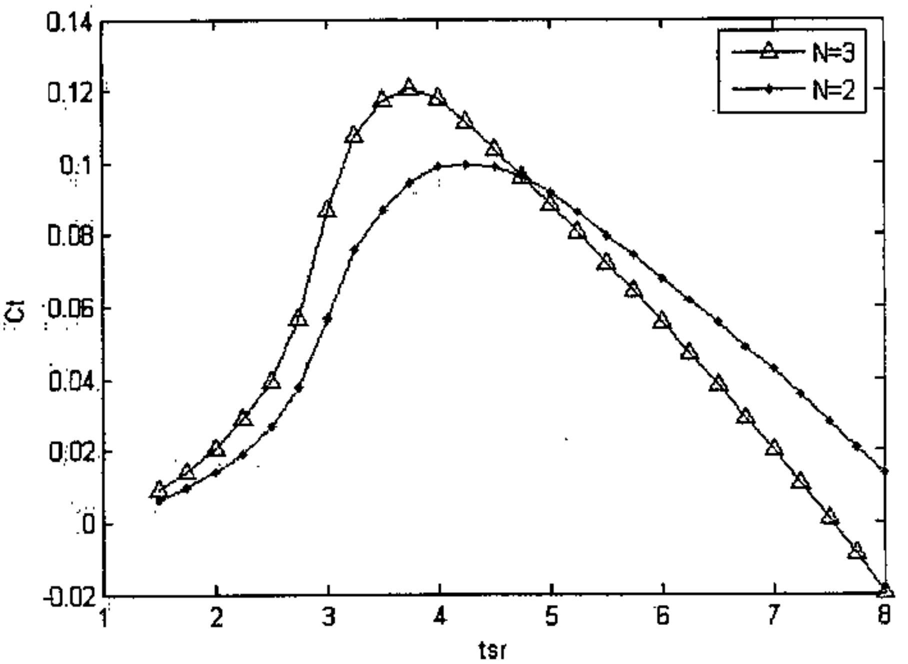


الشكل(4-8).منحني معامل العزم للمقطع naca0012 عند قيم مختلفة لعدد الريشات

- المقطع naca0015 :

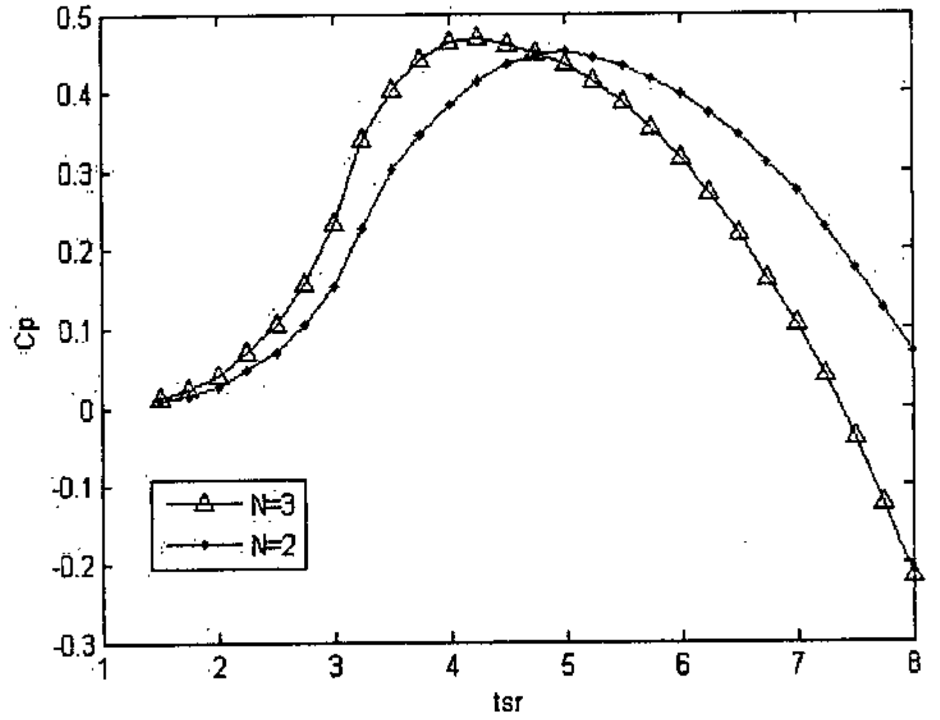


الشكل(4-9) منحني معامل الاستطاعة للمقطع naca0015 عند قيم مختلفة لعدد الريشات

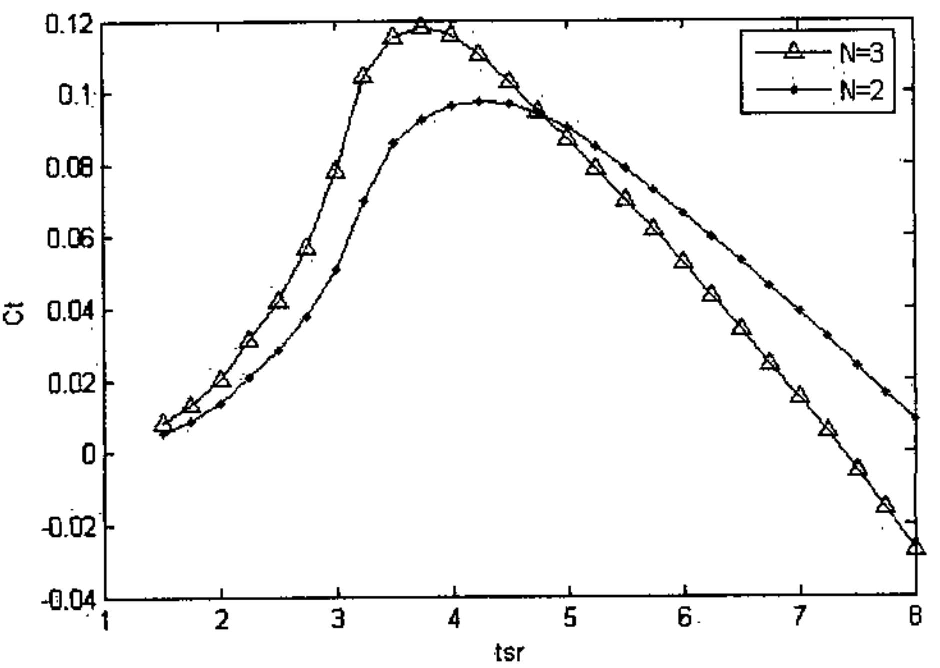


الشكل(4-10) منحني معامل العزم للمقطع naca0015 عند قيم مختلفة لعدد الريشات

- المقطع naca0018 :

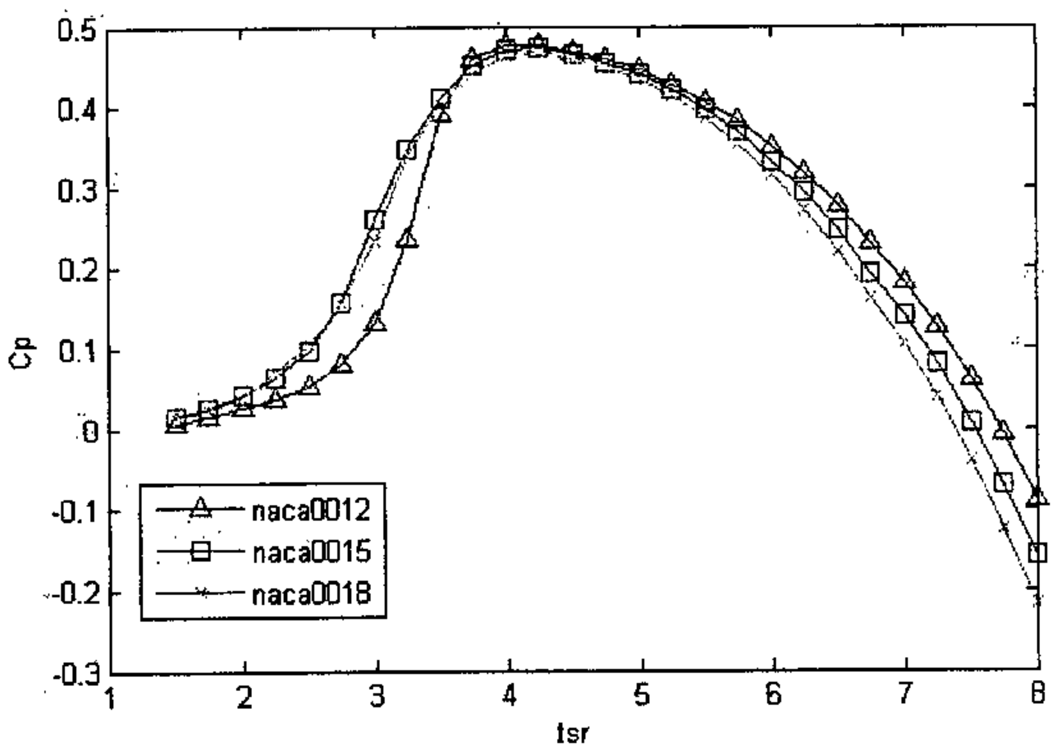


الشكل(4−11) منحني معامل الاستطاعة للمقطع naca0018 عند قيم مختلفة لعدد الريشات

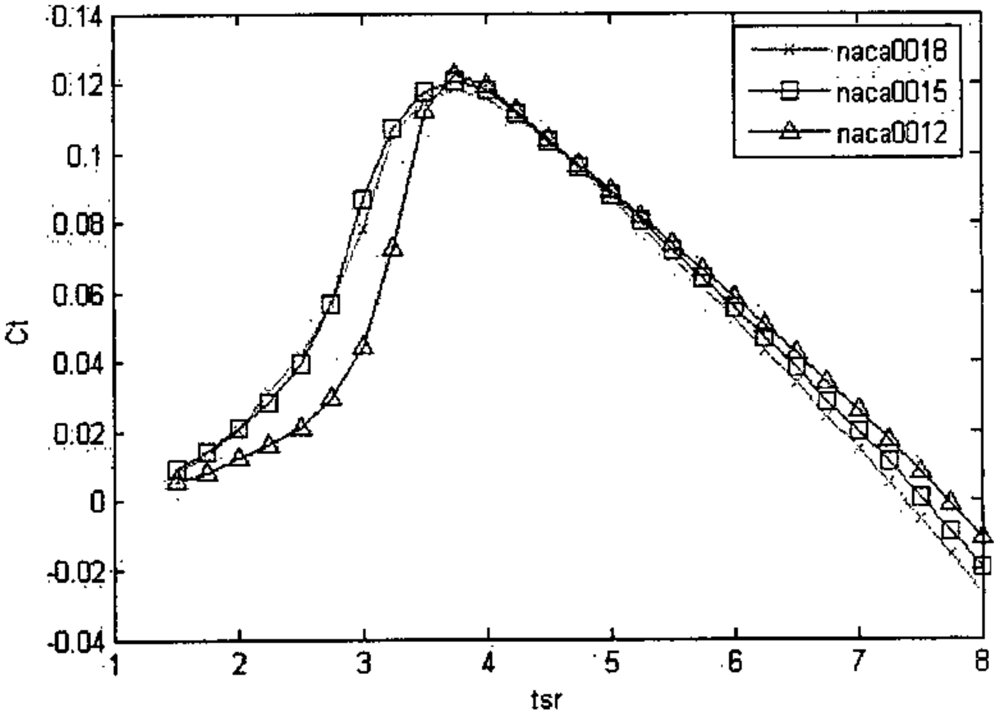


الشكل(4−12) منحني معامل العزم للمقطع naca0018 عند قيم مختلفة لعدد الريشات

المجموعة الرابعة من المنحنيات: تبين هذه المجموعة مقارنة لمنحنيات الأداء لجميع المقاطع الانسيابية المستخدمة في الدراسة حيث تمت هذه المقارنة عند عدد ريشات قدره (3) ويلاحظ من هذه المنحنيات تساوي المقاطع الثلاثة بقيمة مثلى لمعامل العزم ومعامل الاستطاعة المقابلة لقيمة معينة لنسبة السرعة المحيطية إلا إن عزم الإقلاع للدوار عند استخدام المقطع naca0012 أقل من المقطعين الآخرين naca0015 و naca0018 , وبالمقابل فإن المقطع naca0012 يتميز بأداء أفضل بقليل منهما عند قيم كبيرة لنسبة السرعة المحيطية.

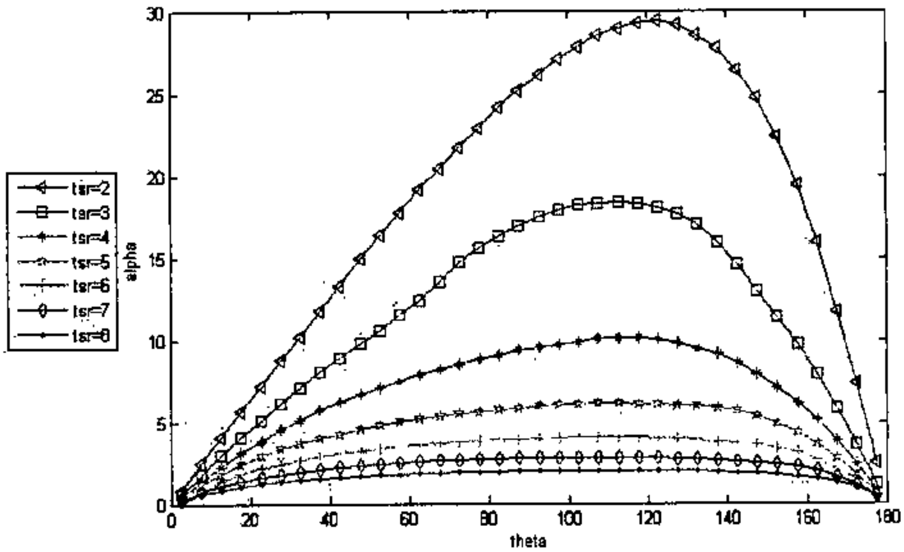


الشكل(4-13) مقارنة لمنحنيات معامل الاستطاعة للمقاطع الانسيابية المختلفة عند عدد ريشات(3)



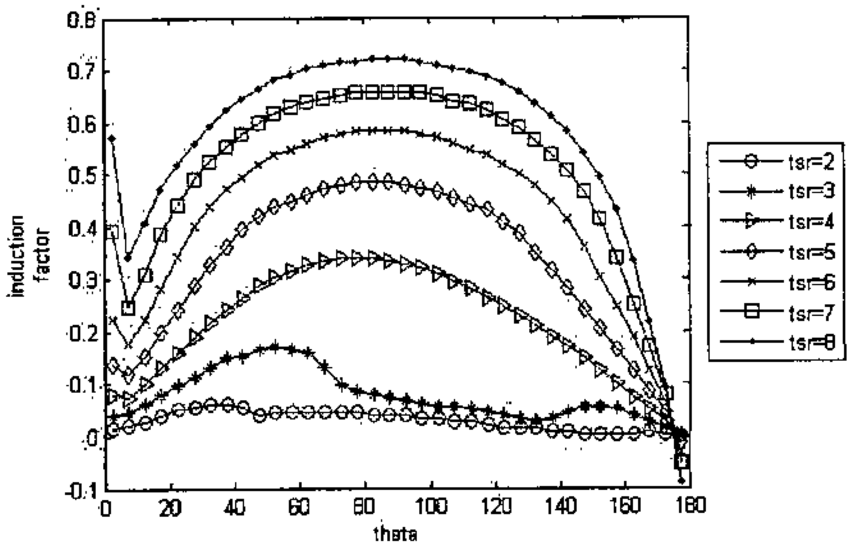
الشكل(4-14) مقارنة لمنحنيات معامل العزم للمقاطع الانسيابية المختلفة عند عدد ريشات (3)

-المجموعة الخامسة من المنحنيات: تبين هذه المجموعة تغير كل من زاوية الهجوم ورقم رينولدز ومعامل التحريض مع وضعية الريشة في أثناء عبورها للنصف الأمامي من الدوار عند قيم مختلفة لنسبة السرعة المحيطية, حيث تم رسم هذه المنحنيات عند استخدام المقطع الانسيابيnaca0012 . يظهر الشكل(4-15) تغير زاوية الهجوم خلال مرور الريشة في النصف الأمامي من الدوار حيث يلاحظ تغير قيمة زاوية الهجوم عند كل وضعية زاوية للريشة في مستوي الدوران مما يؤدي إلى تغير القوى المؤثرة على الريشة وبالتالي تغير العزم المتولد وتغير سرعة الدوران, في حين أن زاوية الهجوم تصبح أكثر ميلاً للاستقرار مع ازدياد نسبة السرعة المحيطية إلا أنه في مرحلة الإقلاع يكون تغير زاوية الهجوم أثناء الدوران كبيراً مما يضعف من عزم إقلاع الدوار. أما بالنسبة لتغير زاوية الهجوم أثناء الدوران في النصف الخلفي من الدوار سيكون مناظراً لهذه للمنحنيات بالنسبة لمحور الزاوية θ الأفقي, قارن الشكل(4-15).

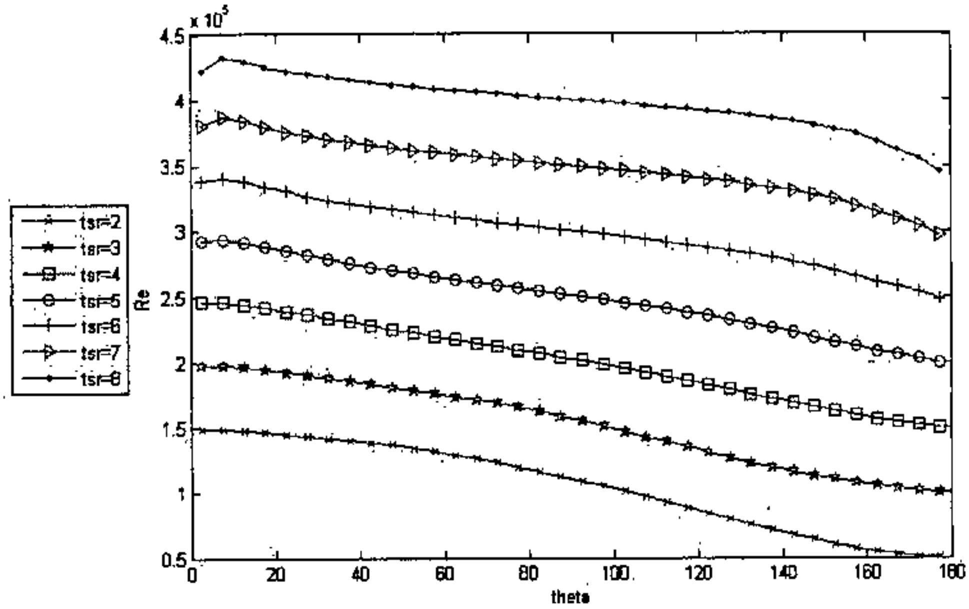


الشكل (4-15) تغير زاوية الهجوم للريشة في أثناء مرورها بالنصف الأمامي للدوار عند قيم مختلفة لنسبة السرعة المحيطية بالنسبة للمقطع naca0012

يبين الشكل(4-16) تغير معامل التحريض مع تغير وضعية الريشة في مستوي الدوران, حيث يلاحظ ازدياد قيم معامل التحريض مع ازدياد نسبة السرعة المحيطية للدوار, كما يلاحظ أن أفضل الوضعيات التي تتولد عندها قوى الرفع الفعالة تكون محصورة بين الوضعين الزاويين (80°) و (100°).

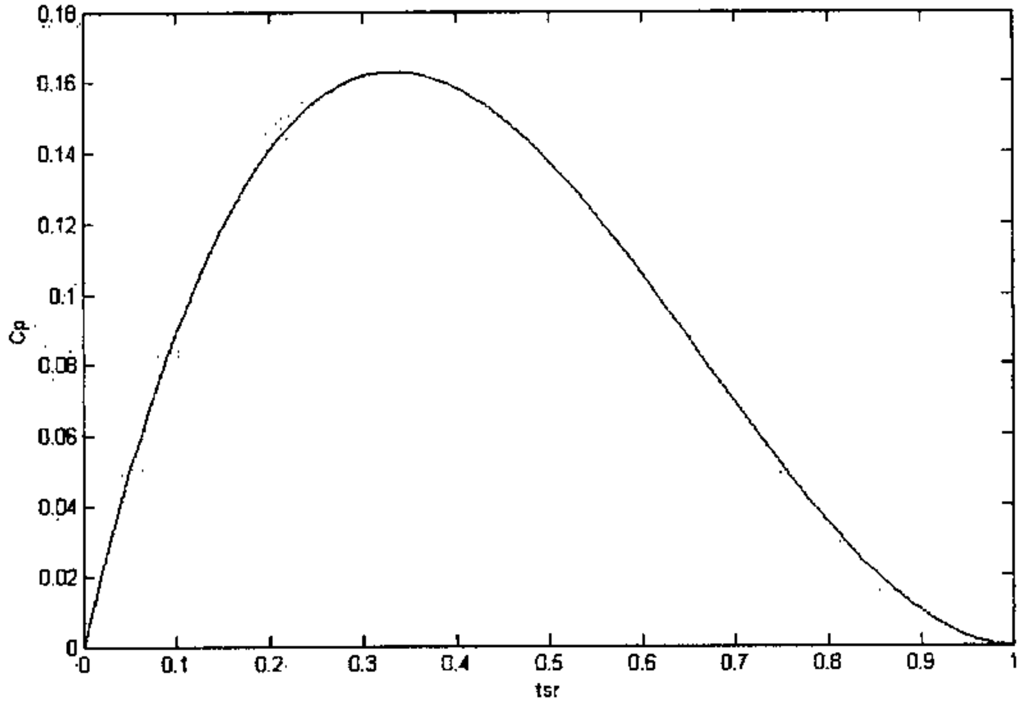


الشكل (4-16) تغير معامل التحريض في كل مجرى من المجاري خلال مرور الريشة في النصف الأمامي من الدوار وعند قيم مختلفة لنسبة السرعة المحيطية بالنسبة للمقطع naca0012



الشكل (4-17) تغير رقم رينولدز في كل مجرى من المجاري عند مرور الريشة في النصف الأمامي للدوار عند قيم مختلفة لنسبة السرعة المحيطية بالنسبة للمقطع naca0012

المجموعة السادسة من المنحنيات: يظهر في هذه المجموعة منحني أداء دوار سافونيوس الذي يؤكد إمكانية هذا الدوار على الإقلاع عند قيمة قليلة لنسبة السرعة المحيطية لكنه بنفس الوقت لا يقدم أي استطاعة عندما تصبح السرعة المحيطية عند مركز نصف الاسطوانة أكبر من سرعة التيار الحر, كما يلاحظ تدني المردود الأعظمي لهذا الدوار مقارنته مع منحنيات الأداء الناتجة من نمذجة دوار داريوس. حيث تم إجراء هذه النمذجة عند قيمة لمعامل الدفع مقدارها (2.2) بحسب المرجع / 6 /.

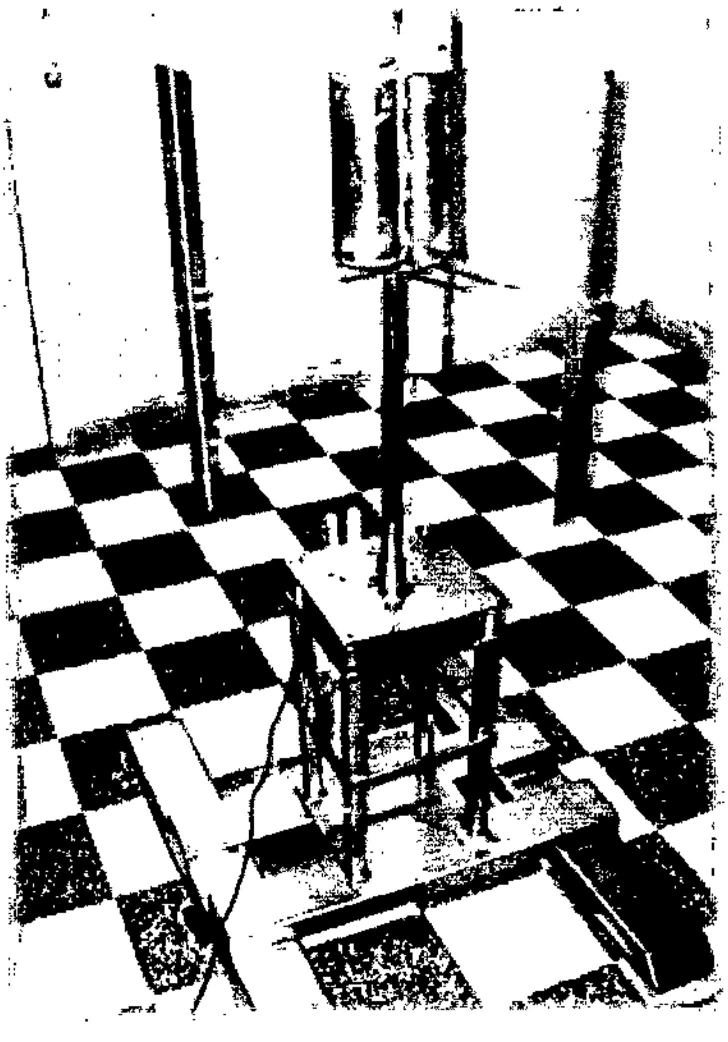


الشكل (4-18) منحني أداء دوار سافونيوس

الفصل الخامس

تصميم وتصنيع واختبار دوار سافونيوس/داريوس

تم تصميم وتصنيع دوار يعمل بمبدأ سافونيوس/داريوس يؤمن إمكانية ربط ميكانيكي لدوار سافونيوس على نفس محور الدوران الشاقولي المرتبط مع ريشات دوار داريوس. تمت عملية التصميم والتصنيع بشكل تكون فيه عطالة الأجزاء المتحركة وقوى الاحتكاك المؤثرة أصغر ما يمكن. الشكل(5-1) يبين صورة لأحد نماذج الدوار وهو dar3sav1.

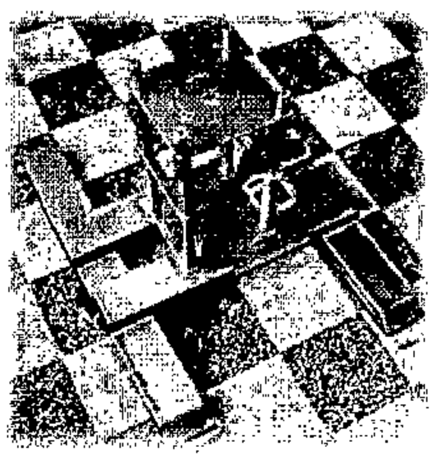


الشكل (5-1) نموذج دوار سافونيوس/داريوس - dar3sav1

5-1- أجزاء دوار سافونيوس /داريوس:

يتكون هذا الدوار من الأجزاء التالية (قارن الملحق(جـ)):

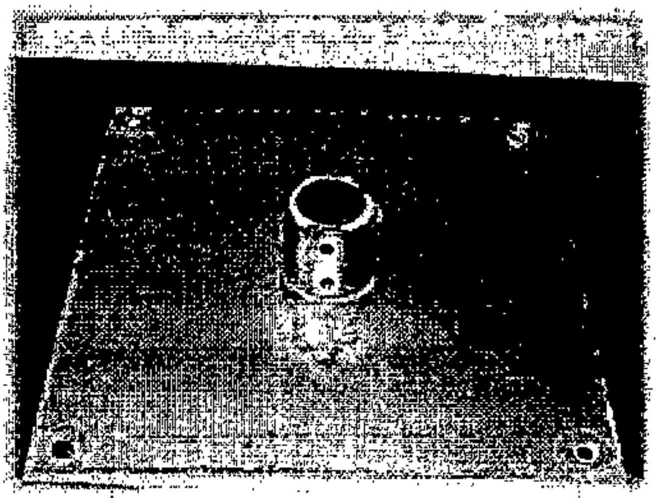
5-1-1- القاعدة: تم تصنيع القاعدة من الفولاذ لتحقق ثبات واستقرار للدوار أثناء الدوران, الشكل(5-2), وتتكون من المقاطع الطولية والعرضية الأفقية التي تستند على الأرض والمقاطع الشاقولية والغطائين المربعين السفلي والعلوي اللذين يحققان مع أعصاب الشد الجانبية تماسك المقاطع الشاقولية مع بعضها إضافة إلى الأصابع الأربعة الاسطوانية التي تربط الغطاء العلوي مع كرسي الدوار حيث تم تشغيل هذه الأصابع بواسطة مخرطة تقليدية, قارن الشكل(5-3). تم لحام أجزاء هذه القاعدة بطريقة اللحام بالقوس الكهربائي فيما عدا الأصابع تمت عملية تثبيتها مع الغطاء العلوي من خلال عملية اللحام بالفضة التي تؤمن متانة كبيرة وجمالية في المظهر. كما تم طلاء هذه القاعدة بطلاء حراري ذو لون أزرق سماوي (رمزه بحسب ترميز الطلاء الحراري للسيارات الحديثة هو (L1)). كما تم لصق طبقة رقيقة من المطاط المرن في أسفل الدوار لتخميد الاهتزازات في حال ظهورها ولتعطي تماسكاً أكثر للقاعدة مع الأرض. تم تثقيب الغطاء العلوي بواسطة فارزة عمودية بعدد من الثقوب المنتظمة يبلغ عددها (36) ثقب قطر كل منها (6 mm) لتساعد في تثبيت الدوار عند وضعية (زاوية) معينة, الشكل(5-2) يبين قاعدة الدوار.



الشكل(5-2) قاعدة الدوار

5-1-2- كرسي الدوار:

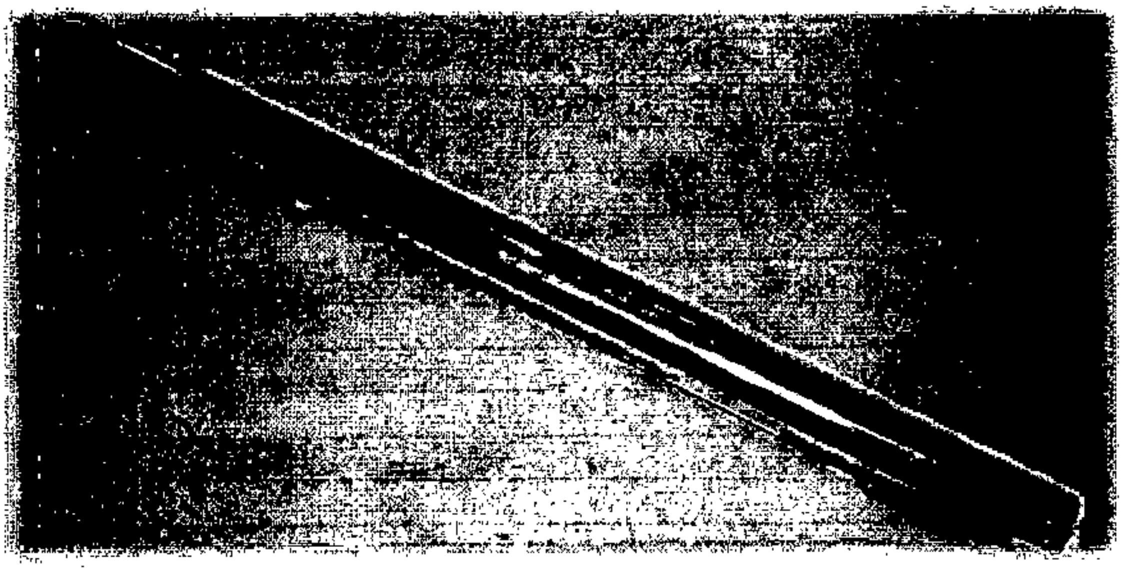
يتكون كرسي الدوار من صفيحة فولاذية متقبة لتثبيتها مع أصابع القاعدة بواسطة براغي ورنديلات مسطحة وجوانات مطاطية مرنة لتخميد الاهتزاز, حيث تم طلاء هذه الصفيحة بنفس طلاء القاعدة. كما تم تشغيل اسطوانة فولاذية بواسطة مخرطة تقليدية وتم لحامها بلحام الفضة على هذه الصفيحة ليثبت عليها حاضن محور الدوران بواسطة براغي وتم تلبيس هذه الاسطوانة بالكروم في وعاء التحليل الكهربائي لإعطائها المظهر البراق. الشكل(5-3) يبين كرسي الدوار.



الشكل(5-3) كرسي الدوار

5-1-3- حاضن محور الدوران:

تم تصنيع هذا الحاضن من الفولاذ وهو عبارة عن أنبوب مفرغ تم تشغليه بواسطة مخرطة تقليدية بحيث يمكن تثبيت كراسي المحامل الدحروجية عند قمته وأسفله. جهز حاضن المحور بثقوب من الأسفل ليثبت عن طريق براغي مع اسطوانة كرسي الدوار. وتم تلبيسه بالكروم في وعاء التحليل الكهربائي ليعطيه المظهر الجميل البرّاق. الشكل(5-4) يبين حاضن محور الدوران.



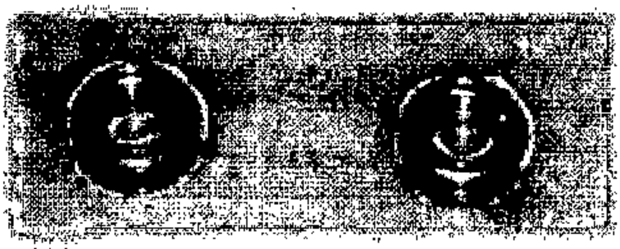
الشكل(5-4) حاضن محور الدوران

5-1-4- المحامل الدحروجية والكراسي المخصصة لها:

تم تثبيت محور الدوران مع حاضن المحور عن طريق محملين دحروجيين كرويين من طراز (688) من صناعة اليابان. تثبت هذه المحامل ضمن حاضن المحور عن طريق كرسيين علوي وسفلي لهما أماكن مخصصة لتثبيتهما ضمن حاضن المحور.



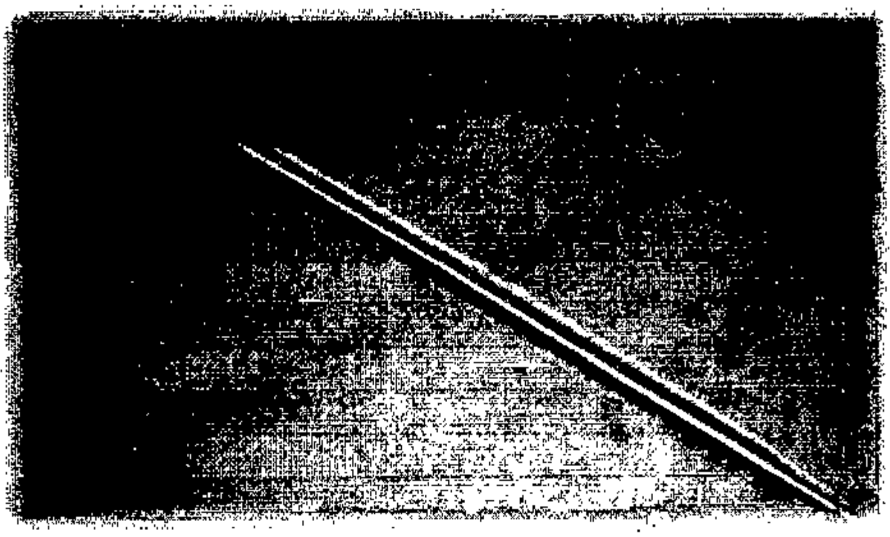
الشكل(5-5) كراسي المحامل الدحروجية



الشكل(5-6) المحامل الدحروجية

5-1-5- محور الدوران:

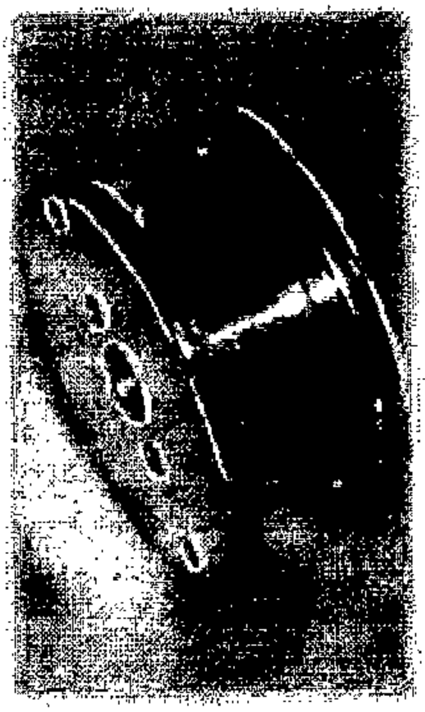
تم تصنيع محور الدوران من الألمنيوم لما يقدمه هذا المعدن من عطالة صغيرة ومقاومة كبيرة وقد تمت عملية التشغيل بواسطة مخرطة تقليدية وتمت عملية الثقب بواسطة فارزة مبرمجة بعد فشل ثلاث محاولات لثقبه على مثاقب تقليدية, حيث تم ثقب المحور من الأعلى ليتم تثبيته مع السرّة عبر برغي وصامولة ورنديلات نابضية وتم ثقبه من الأسفل أيضاً لتثبت فيه أداة القياس. تم تصنيع المحور بمقاطع متدرجة القطر زيادة ثم نقصاناً لضمان عمله بشكل سليم وليتحمل الإجهادات المختلفة التي يتعرض لها.

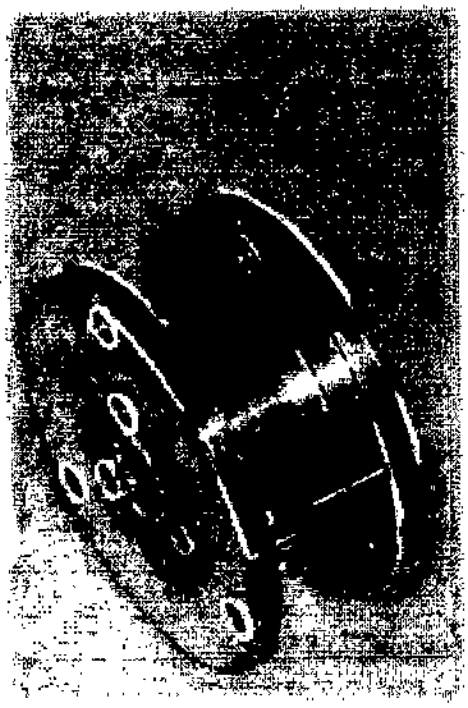


الشكل(5-7) محور الدوران

5-1-6- السرّة:

تم تصنيع سرّتين (سرّة للنماذج ثنائية الريشات وأخرى للنماذج ثلاثية الريشات) من مادة الألمنيوم بواسطة مخرطة تقليدية وتم تثقيبهما بواسطة فارزة مبرمجة أيضاً ليكون هناك دقة عالية في عملية تثبيت أذرع التوصيل مع السرّة ومع محور الدوران وتم في النهاية معالجة سطحهما ليظهرا بمظهر لامع وبرّاق.

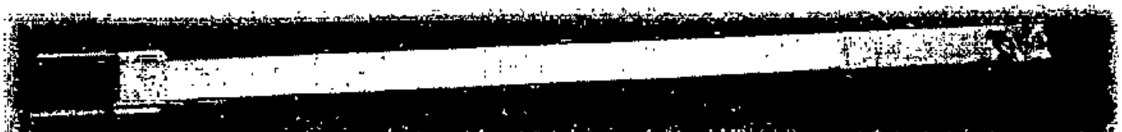




الشكل(5-8) سرّتي الدوار للنماذج ثنائية وثلاثية الريشات

5-1-7- أذرع التوصيل:

تم تصنيعها من الصاج المغلفن بالتوتياء وتم تثبيت برغيين بطرف كل ذراع بطريقة لحام الفضة لتقوم هذه البراغي باختراق الريشات وتثبيتها مع ذراع التوصيل, كما تم تثقيب الطرف الآخر للذراع بثقبين لتثبيته مع السرّة وتم أيضاً تثقيب الأذرع العلوية بثقب إضافي ليثبت من خلالها دوار سافونيوس مع دوار داريوس. كما تم جلخ جوانب هذه الأذرع على آلة تسوية السطوح لتصبح حافتها حادة كالسكين مما يقلل من مقاومة الهواء عليها أثناء الدوران وفي النهاية تم طلاء هذه الأذرع بلون رمادي.



الشكل(5-9) ذراع التوصيل

5-1-8-الريشات:

بناءً على نتائج النمذجة الحاسوبية والموضحة بالشكل (4-13) والشكل (4-14) التي بينت أن المقطع الانسيابي naca0012 يبدي أضعف عزم إقلاع مقارنة بالمقاطع الأخرى المدروسة وهي naca0012 وnaca0015 وnaca0018 وكونه يمثل بذلك الحالة الأسوأ من حيث ظروف الإقلاع تم اختياره كمقطع انسيابي لريشات الدوار المصنع بكون هذا البحث يهدف لتحسين ظروف الإقلاع لدوار داريوس, حيث تم تصنيع هذه الريشات ليكون للريشة طول وتر قدره (7cm) وارتفاع قدره (50 cm) .



naca001 naca0015 naca0012

الشكل (5-10) صور للمقاطع الانسيابية المستخدمة في النمذجة

تم تصنيع الريشة من خشب السّويد وتم تثقيبها أربعة ثقوب لتثبت مع أذرع التوصيل بواسطة صواميل ورنديلات نابضية ورنديلات مسطحة, / 23 /.



الشكل(5-11) ريشة الدوار ذات المقطع الانسيابي naca0012

5-1-9- دوار سافونيوس:

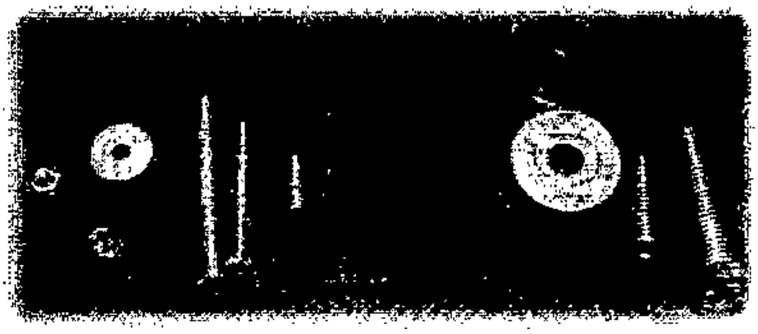
تم تصنيع نموذجين مختلفين لدوار سافونيوس بقياسين مختلفين. النموذج الصغير قطره (14 cm) وارتفاعه (21 cm) وقطر نصف اسطوانته (7.5 cm). أما النموذج الكبير فكان قطره (18 cm) وارتفاعه (25 cm) وقطر نصف اسطوانته (9.5 cm). تم لحام نصفي الاسطوانتين على غطائي الدوار بواسطة لحام القصدير وتم تثقيب الغطاء السفلي ليسهل تثبيته مع السرّة وأذرع التوصيل.



الشكل(5-12) نموذجي دوار سافونيوس

5-1-10- أدوات الربط والتثبيت:

تم استخدام مجموعة من البراغي والصواميل والرنديلات المسطحة والرنديلات النابضية بقطرين مختلفين الأول (3 mm) والثاني (6 mm) لربط وتثبيت أجزاء الدوار النموذج مع بعضها البعض.



الشكل(5-13) أدوات الشد والتثبيت المستخدمة

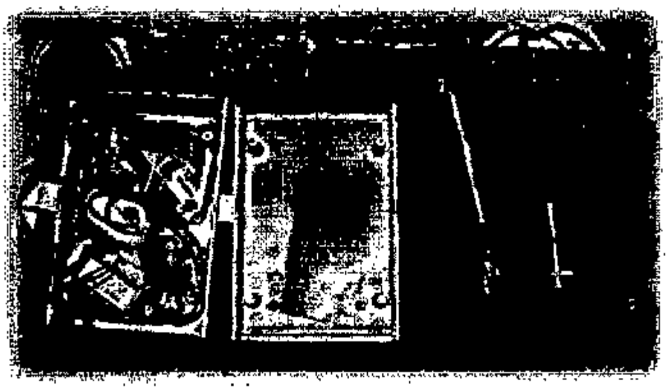
- يبين الجدول (5-1) كتلة كل جزء من أجزاء الدوار المصنع كما يبين الجدول أيضاً عزم العطالة حول محور الدوران للأجزاء المتحركة إضافةً إلى كلفة تصنيع كل جزء من أجزاء الدوار. / 5 /.

تكلفة التصنيع [ل.س]	عزم عطالة الأجزاء المتحركة [kg.m^2]	الكتلة [gr]	اسم الجزء
15000	—	55000	القاعدة و كرسي الدوار
3000	—	1750	حاضن المحور و كراسي المحامل و المحامل
4000	0.000003	147.7	محور الدوران
2000	0.000004	27.20	السرّة الثنائية
2000	0.000004	26.90	السرّة الثلاثية
1200	0.00028	260	نموذج دوار سافونيوس الصغير
1200	0.00046	310	نموذج دوار سافونيوس الكبير
2000	0.0032	166	ذراعي التوصيل العلوية والسفلية معاً
2500	0.0064	101	الريشة الواحدة
10	0.00023	3.74	أدوات تثبيت الريشة مع الذراعين
42000	التكلفة الإجمالية التقريبية للدوار (متضمن الريشات الثلاث وأذرع التوصيل الستة و بإهمال كلفة أدوات الربط و التثبيت)		

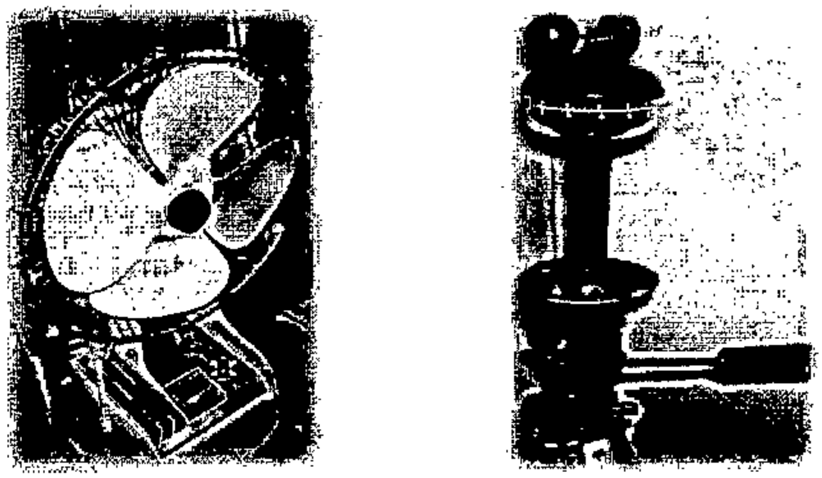
الجدول (5-1) عطالة أجزاء الدوار وكلفة تصنيعها

5-2- اختبار دوار سافونيوس/داريوس:

5-2-1- منصة الاختبار: تتكون منصة الاختبار من حساس ضوئي يعمل بالأشعة تحت الحمراء الذي يتحسس لمرور صفيحة عاكسة مثبتة بأسفل محور الدوران التي تقطع بمرورها الأشعة ويعطي الحساس بدوره إشارة لمعالج الكتروني يحسب الفترات الزمنية بين كل مرورين متتاليين للصفيحة وهذا المعالج الالكتروني موصول مع الحاسب الالكتروني المزود ببرنامج خاص لرسم منحني تغير السرعة الزاوية للدوار مقدرةً بـ [rad/sec] مع الزمن مقدراً بـ [sec], كما يؤمن هذا البرنامج إمكانية تنظيم القراءات المأخوذة في جدول يمكن التعامل مع بياناته من خلال برنامج MATLAB7. كما تم بواسطة أنيمومتر ميكانيكي قياس سرعة الهواء الصادرة عن المروحة التي وضعت أمام الدوار النموذج.



الشكل(5-14) جهاز قياس سرعة الدوران ووحدة الربط مع الحاسب

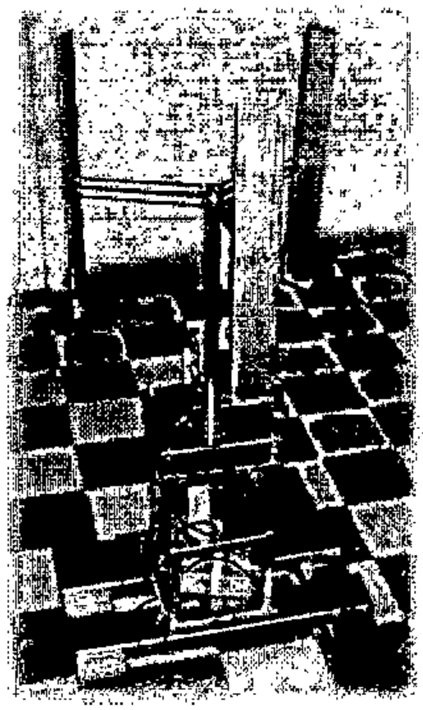


الشكل(5-15) أنيمومتر قياس سرعة الهواء الصادر عن مروحة الاختبار

5-2-2 طريقة الاختبار:

تم اختبار ثمانية نماذج من دوار سافونيوس/داريوس وهي:

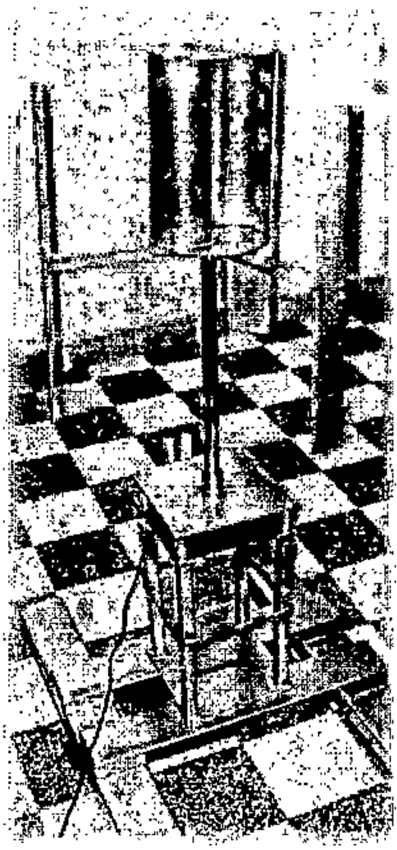
- النموذج الأول (dar3): وهو عبارة عن دوار داريوس المكون من ثلاث ريشات مقطع كل منها هوnaca0012 دون وجود لدوار سافونيوس ضمنه, قارن الشكل(5-16)



الشكل(5-16) نموذج دوار داريوس- dar3

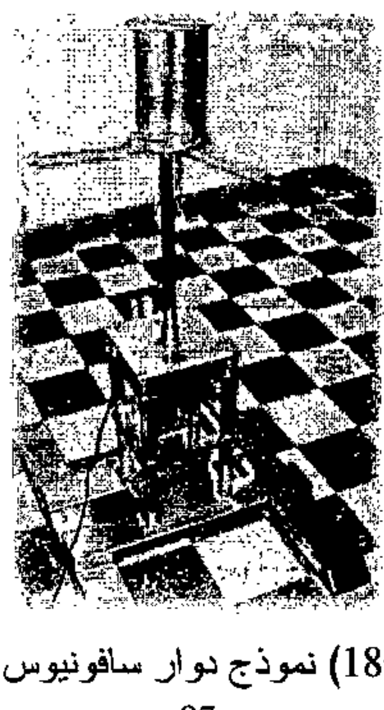
- النموذج الثاني (dar3sav1): وهو عبارة عن دوار داريوس المكون من ثلاثة ريشات مقطع كل منها naca0012 مع وجود لدوار سافونيوس الصغير الذي يبلغ قطره(14 cm), قارن الشكل(5-1).

- النموذج الثالث (dar3sav2): وهو عبارة عن دوار داريوس المكون من ثلاثة ريشات مقطع كل منها naca0012 مع وجود دوار سافونيوس الكبير الذي يبلغ قطره (18 cm), قارن الشكل(5-17).



الشكل(5-17) نموذج دوار سافونيوس/داريوس- dar3sav2

- النموذج الرابع (sav1) : وهو عبارة عن النموذج الصغير لدوار سافونيوس الذي يبلغ قطره (14 cm) بدون وجود ريشات دوار داريوس, الشكل(5-18).



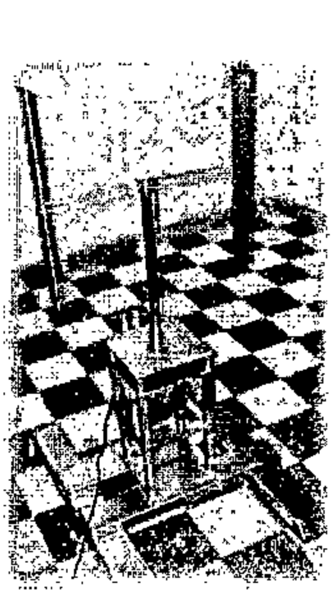
الشكل(5-18) نموذج دوار سافونيوس - sav1

- النموذج الخامس (sav2) : وهو عبارة عن النموذج الكبير لدوار سافونيوس الذي يبلغ قطره (18 cm) بدون وجود ريشات دوار داريوس, الشكل(5-19).



الشكل(5-19) نموذج دوار سافونيوس- sav2

- النموذج السادس (dar2): وهو عبارة عن نموذج دوار داريوس المكون من ريشتين ذات المقطع الانسيابي naca0012 دون وجود لدوار سافونيوس ضمنه, الشكل(5-20).



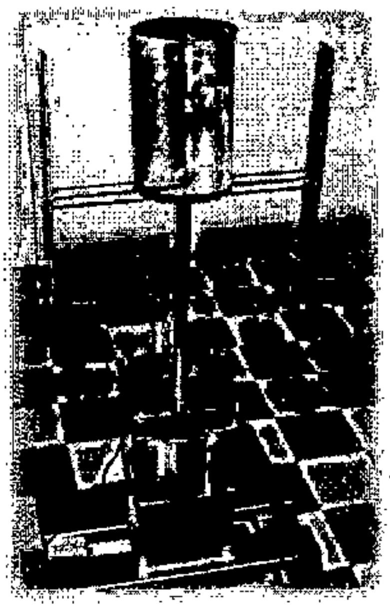
الشكل(5-20) نموذج دوار داريوس- dar2

- النموذج السابع(dar2sav1): وهو عبارة عن دوار داريوس المكون من ريشتين ذات المقطع naca0012 مع وجود نموذج دوار سافونيوس الصغير ذو القطر (14 cm). الشكل(5-21).



الشكل(5-21) نموذج دوار سافونيوس/داريوس- dar2sav1

- النموذج الثامن(dar2sav2): هو عبارة عن دوار داريوس المكون من ريشتين ذات المقطع naca0012 مع وجود نموذج دوار سافونيوس الكبير ذو القطر (18cm). الشكل(5-22).



الشكل(5-22) نموذج دوار سافونيوس/داريوس- dar2sav2

الجدول(5–2) يبين كتلة وعزم عطالة كل نموذج من النماذج المختبرة.

عزم العطالة للأجزاء الدوّارة $[kg.m^2]$	الكتلة [kg]	النموذج
0.0295	57.74	dar3
0.0298	58	dar3sav1
0.03	58.1	dar3sav2
0.0099	57.7	sav1
0.01	57.73	sav2
0.0196	57.47	dar2
0.0198	57.73	dar2sav1
0.02	57.78	dar2sav2

الجدول(5–2) الكتلة وعزم العطالة لكل نموذج من نماذج الدوار

– تم اختبار كل نموذج من النماذج السابقة عند ثلاث سرعات مختلفة لدوران المروحة وتم رسم منحنيات تغير سرعة دوران محور الدوار مع الزمن لكل حالة. كانت سرعة الرياح المقاسة عند كل سرعة لدوران المروحة وعلى بعد (120cm) عن مركز المروحة كما هي مبينة بالجدول (5–3):

سرعة تيار الهواء (m/sec)	مرتبة السرعة
1	السرعة الأولى
2.5	السرعة الثانية
3.75	السرعة الثالثة

الجدول(5–3) قيم سرعات تيار الهواء المقابلة لسرعات دوران مروحة الاختبار على بعد (120 cm)

علماً أن هذه التجارب أجريت ضمن صالة يبلغ طولها (5 m) وعرضها (4 m) وارتفاعها (4 m).

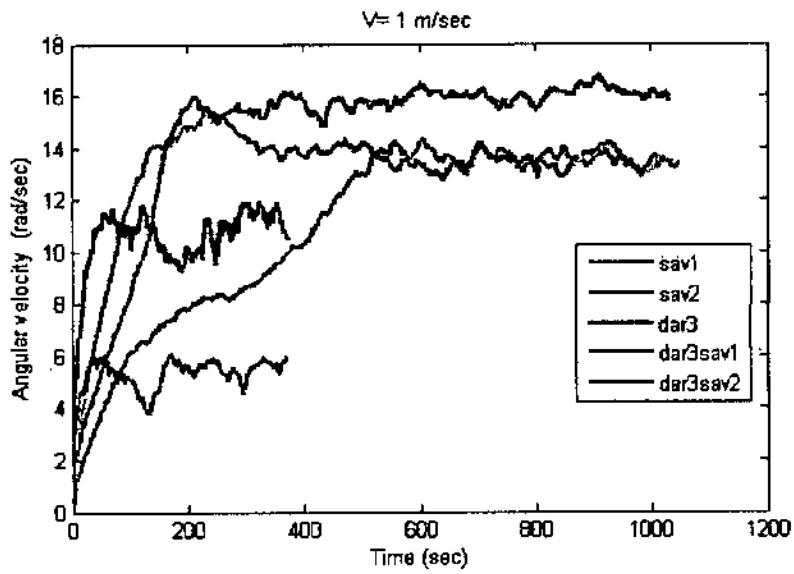
الفصل السادس

نتائج التجارب والمناقشة

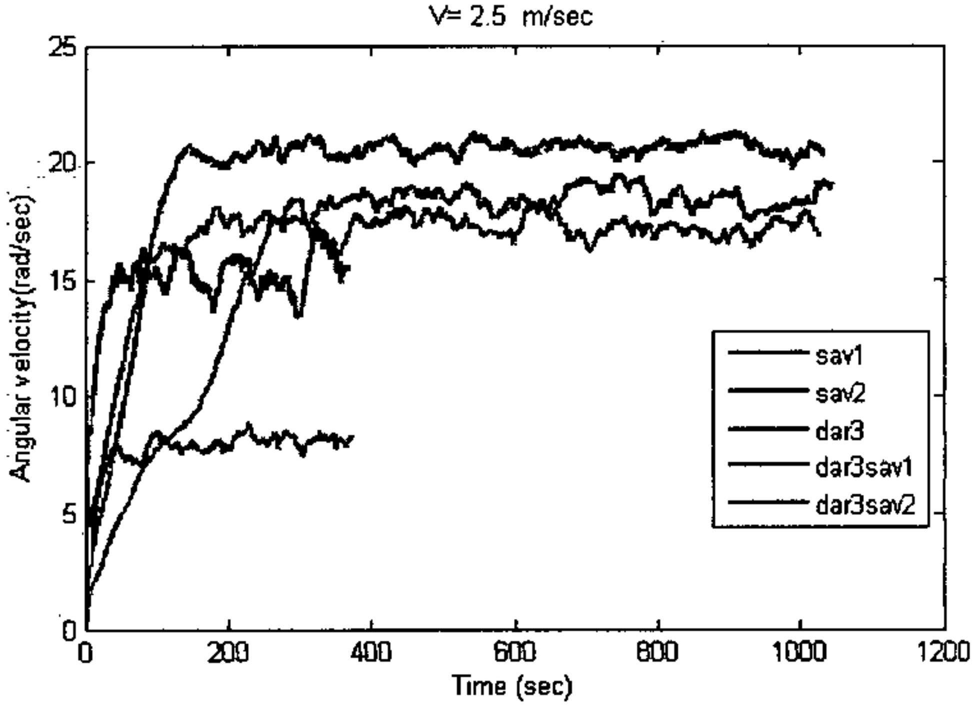
6-1- نتائج التجارب:

بناءً على التجارب التي أجريت على النماذج الثمانية من دوار سافونيوس/داريوس وذلك بدراسة تغير سرعة الدوران مع الزمن عند عدة سرعات لتيار الهواء الصادر عن مروحة الاختبار تم الحصول على ثلاثة مجموعات من النتائج الموضحة من خلال منحنيات بيانية لتغير السرعة الزاوية مقدرة بـ [rad/sec] مع الزمن مقدر بـ [sec] والواردة في سياق النص. كما تم أيضاً رسم منحنيات تغير سرعة الدوران مقدرة بـ [rpm] مع الزمن مقدر بـ[sec] والواردة في الملحق(ب). فيما يلي توضيح لمجموعات نتائج الاختبارات:

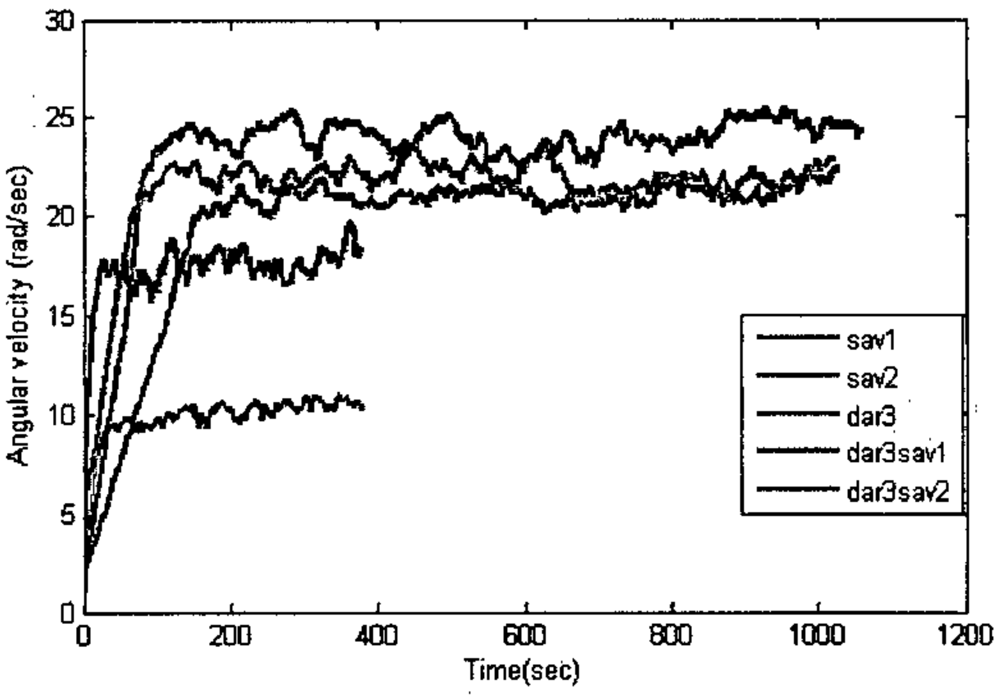
- **<u>المجموعة الأولى:</u>** تم فيها اختبار النماذج الخمسة التالية: dar3, sav1, sav2, dar3sav1, dar3sav2 عند سرعات تيارات الهواء الثلاثة الموضحة بالجدول(5-2) وتم رسم منحنيات تغير السرعة الزاوية مع الزمن عند كل سرعة لتيار الهواء, نتائج هذه المجموعة من التجارب موضحة بالأشكال (6-1), (6-2), (6-3).



الشكل(6-1) نتائج المجموعة الأولى من التجارب عند سرعة الهواء 1m/sec

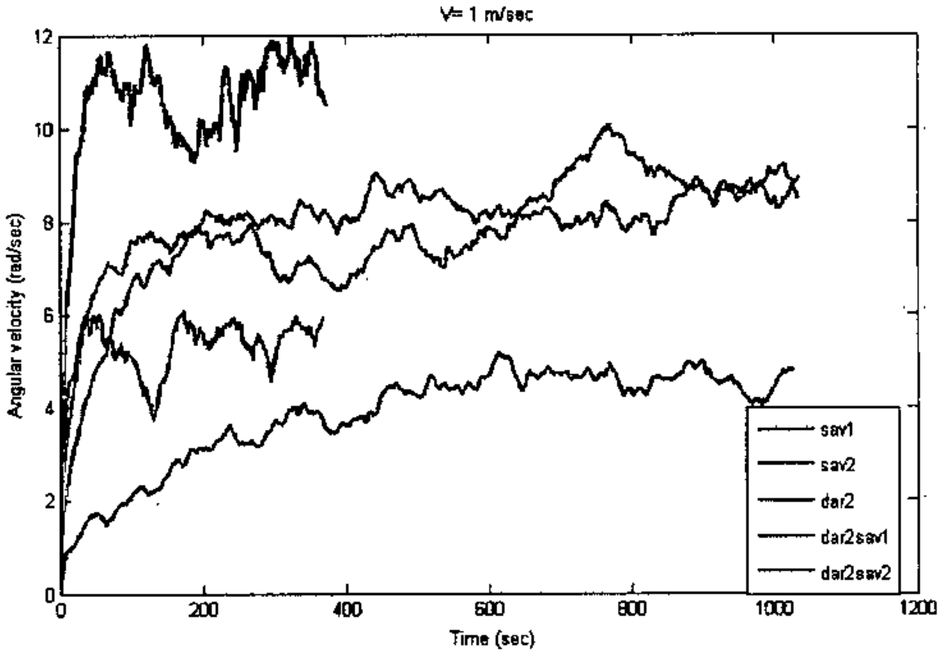


الشكل(6-2)نتائج المجموعة الأولى من التجارب عند سرعة الهواء 2.5 m/sec

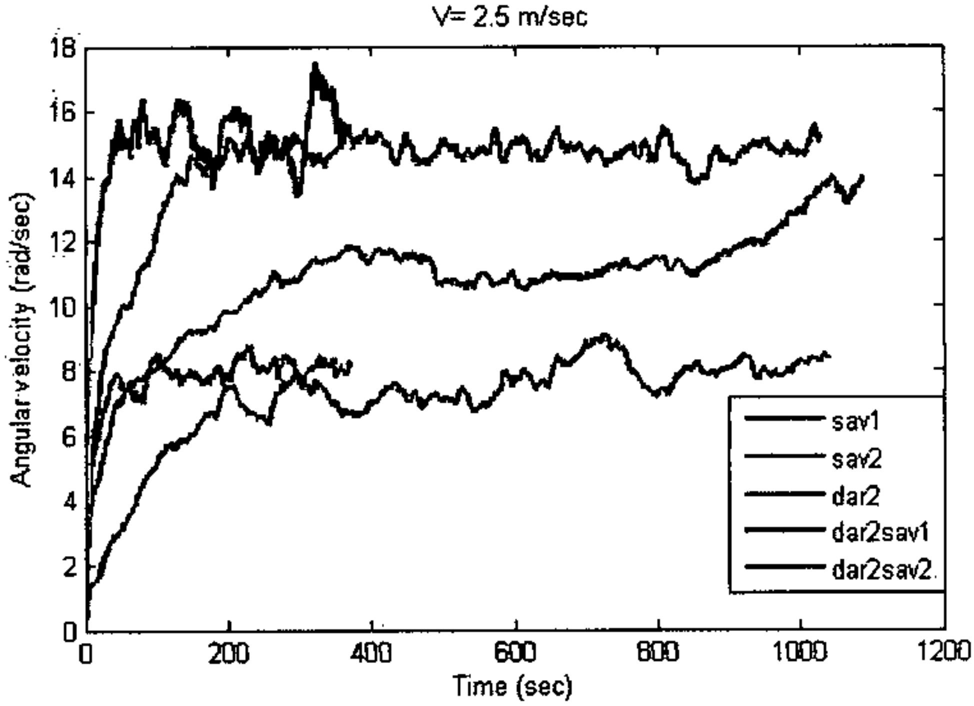


الشكل(6-3)نتائج المجموعة الأولى من التجارب عند سرعة الهواء
3.75 m/sec

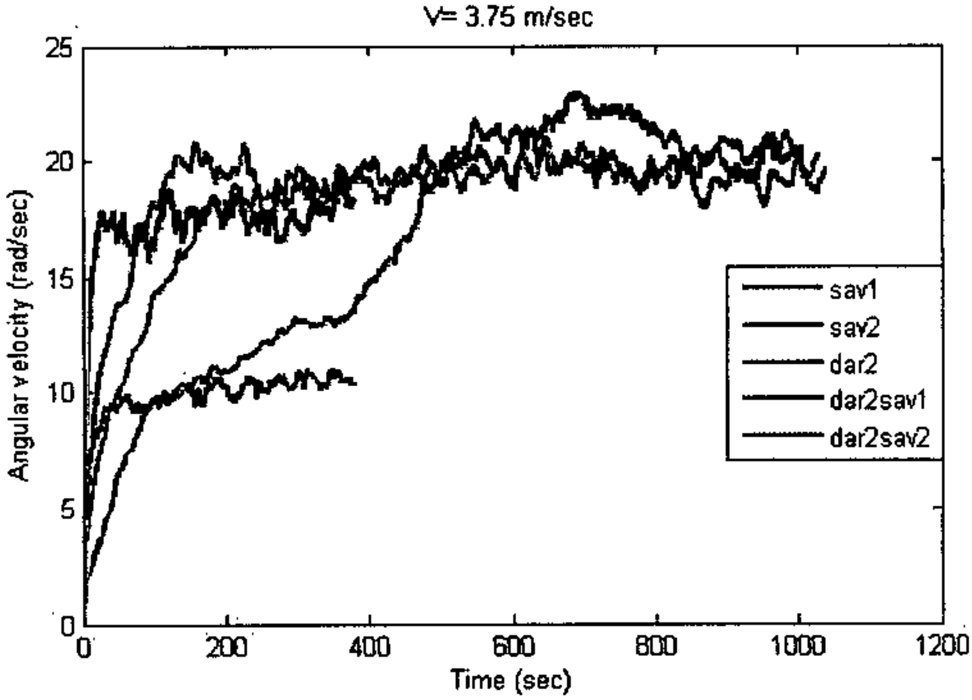
- **المجموعة الثانية:** تم فيها اختبار النماذج الخمسة التالية: dar2, sav1, sav2, dar2sav1, dar2sav2 عند سرعات تيارات الهواء الثلاثة الموضحة بالجدول(5-2) و تم رسم منحنيات تغير السرعة الزاوية مع الزمن عند كل سرعة لتيار الهواء, نتائج هذه المجموعة من التجارب موضحة بالأشكال (6-4), (6-5), (6-6).



الشكل(6-4) نتائج المجموعة الثانية من التجارب عند سرعة الهواء 1m/sec



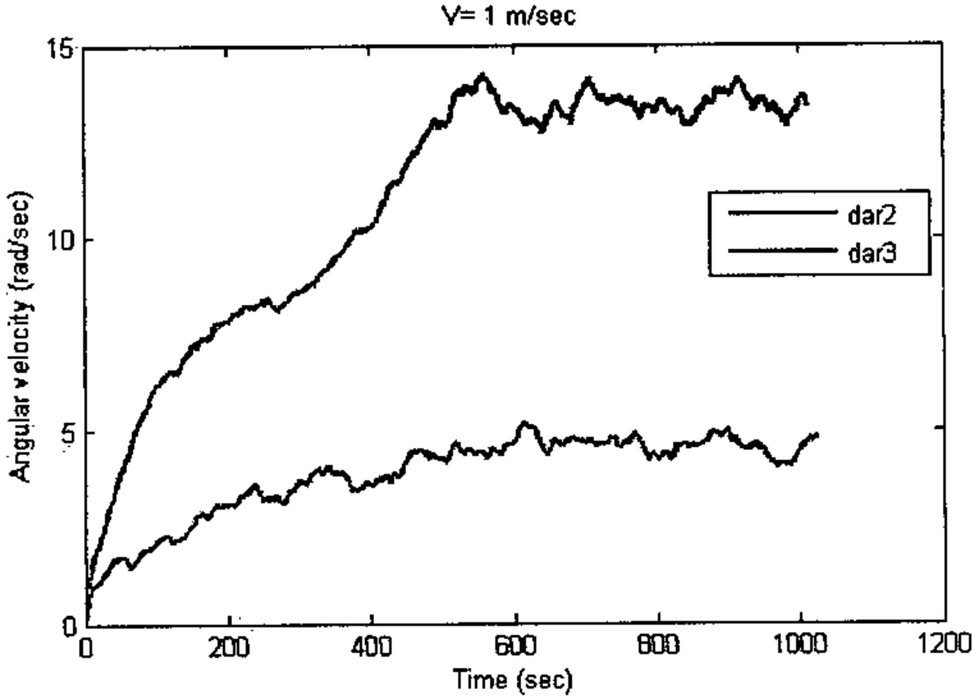
الشكل(6–5) نتائج المجموعة الثانية من التجارب عند سرعة الهواء 2.5 m/sec



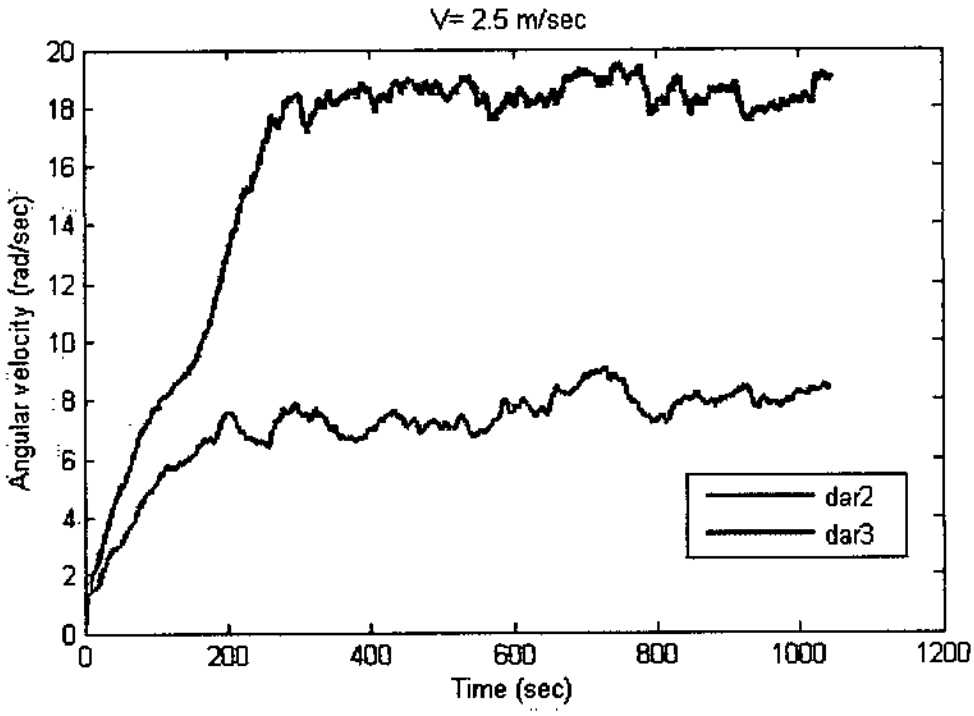
الشكل(6–6) نتائج المجموعة الثانية من التجارب عند سرعة الهواء

3.75 m/sec

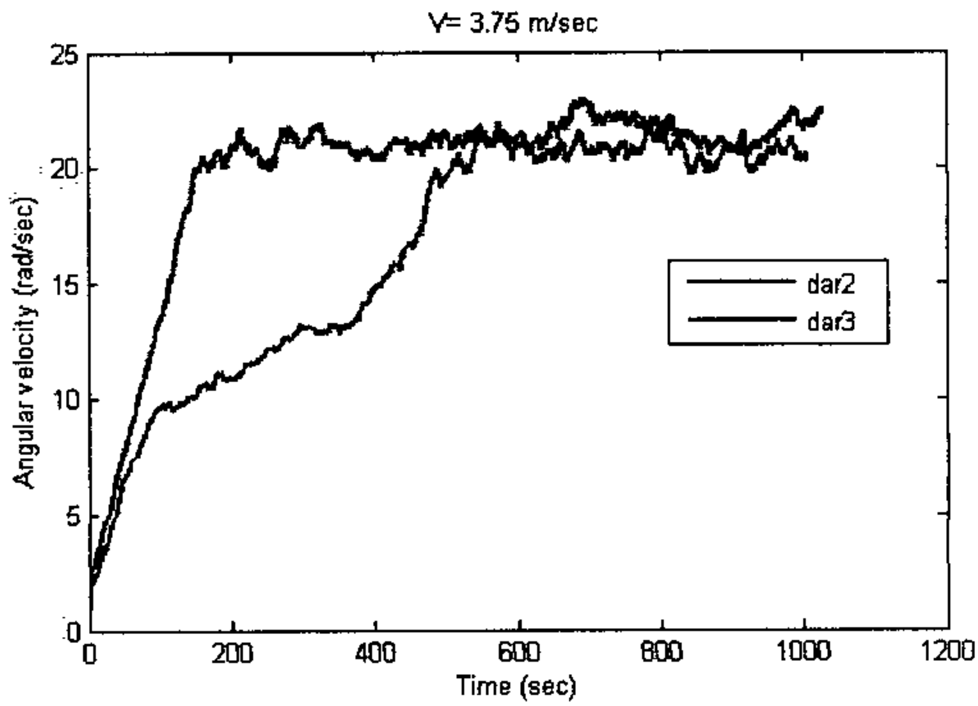
- <u>**المجموعة الثالثة:**</u> تم فيها مقارنة نتائج اختبار النموذجين dar2 و dar3 مع بعضهما, ثم مقارنة النموذجين dar2sav1 و dar3sav1 مع بعضهما, ومن ثم مقارنة النموذجين dar2sav2 وdar3sav2 مع بعضهما وذلك عند كل سرعة من سرعات تيار الهواء المبينة بالجدول(5-2) والنتائج مبينة بالأشكال (6-7), (6-8), (6-9), (6-10), (6-11), (6-12), (6-13), (6-14), (6-15).



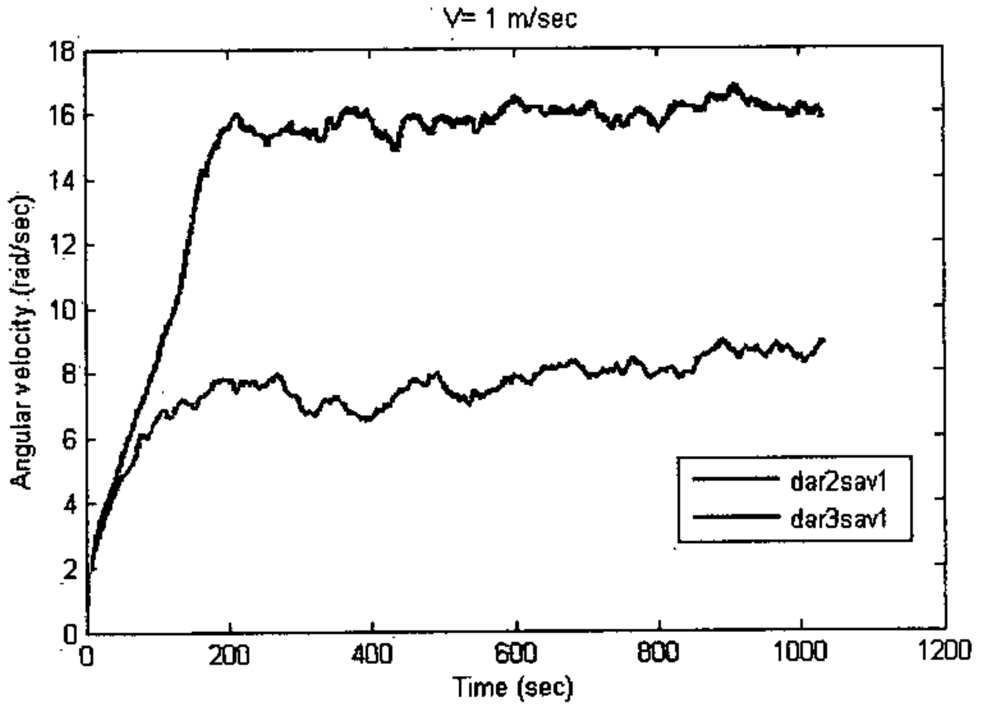
الشكل(6-7) نتائج اختبار النموذجين dar2 و dar3 عند سرعة الهواء 1m/sec



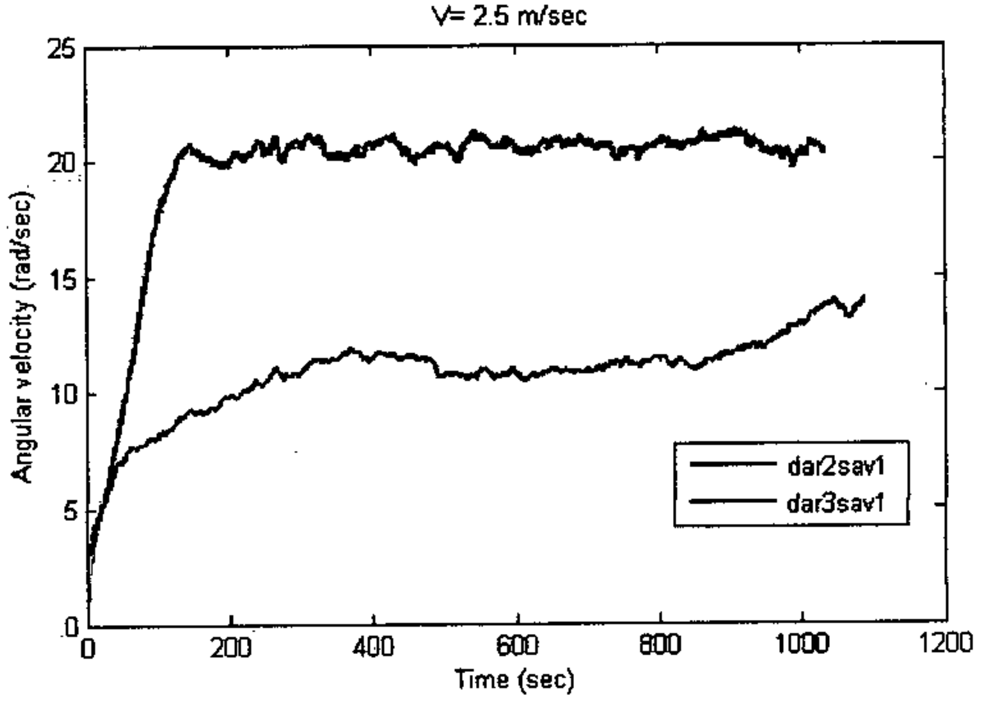
الشكل(6–8) نتائج اختبار النموذجين dar2 و dar3 عند سرعة الهواء 2.5m/sec



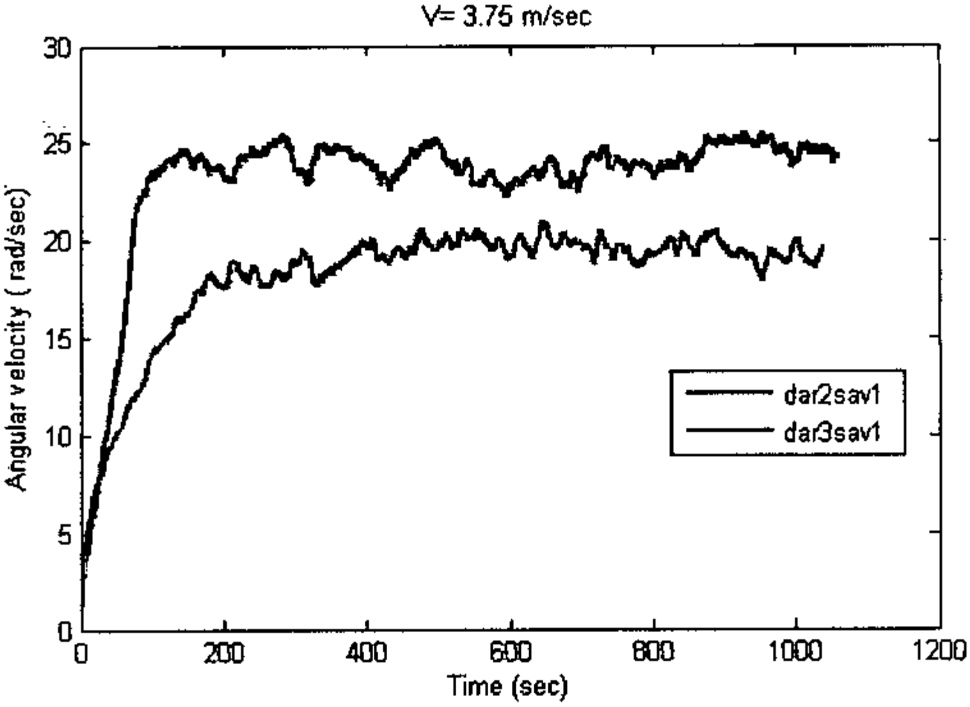
الشكل(6–9) نتائج اختبار النموذجين dar2 و dar3 عند سرعة الهواء 3.75m/sec



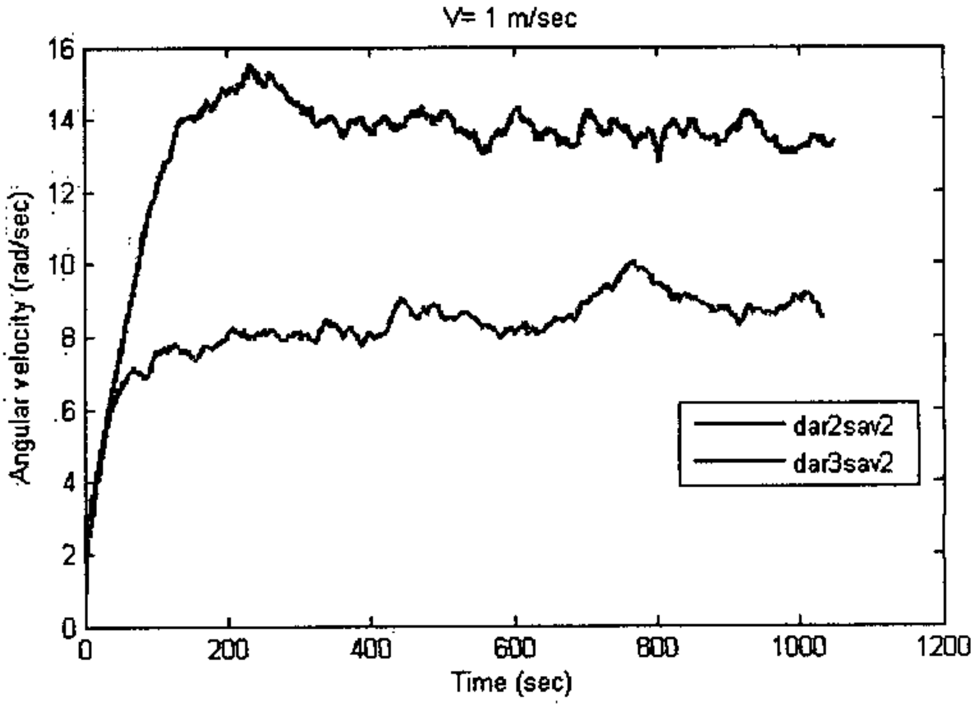
الشكل(6−10) نتائج اختبار النموذجين dar2sav1 و dar3sav1 عند سرعة الهواء 1m/sec



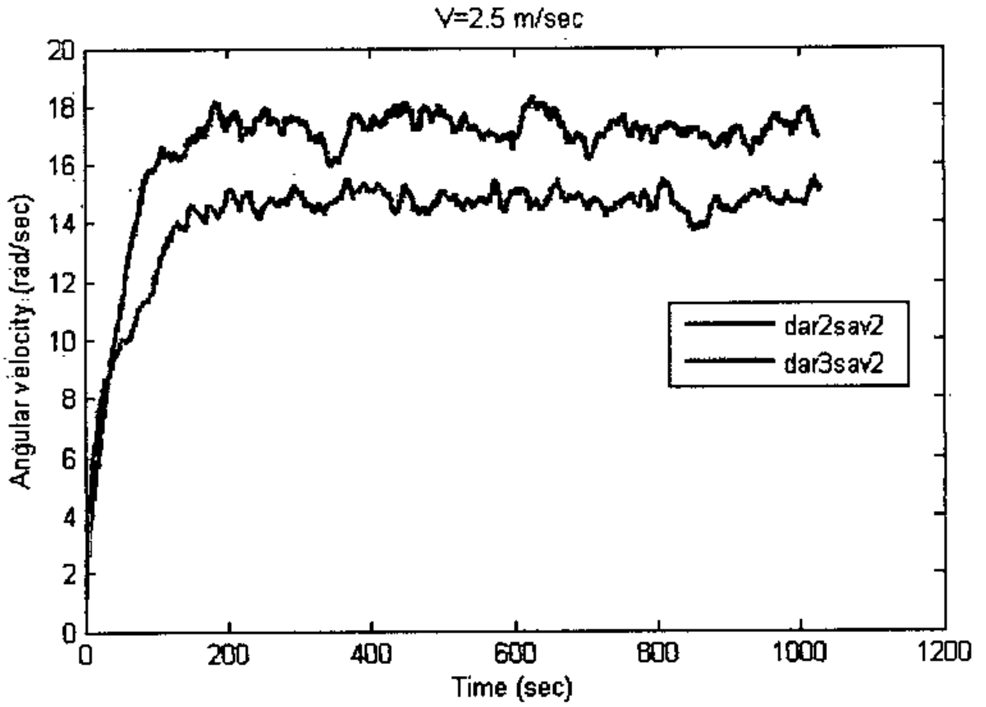
الشكل(6−11) نتائج اختبار النموذجين dar2sav1 و dar3sav1 عند سرعة الهواء 2.5m/sec



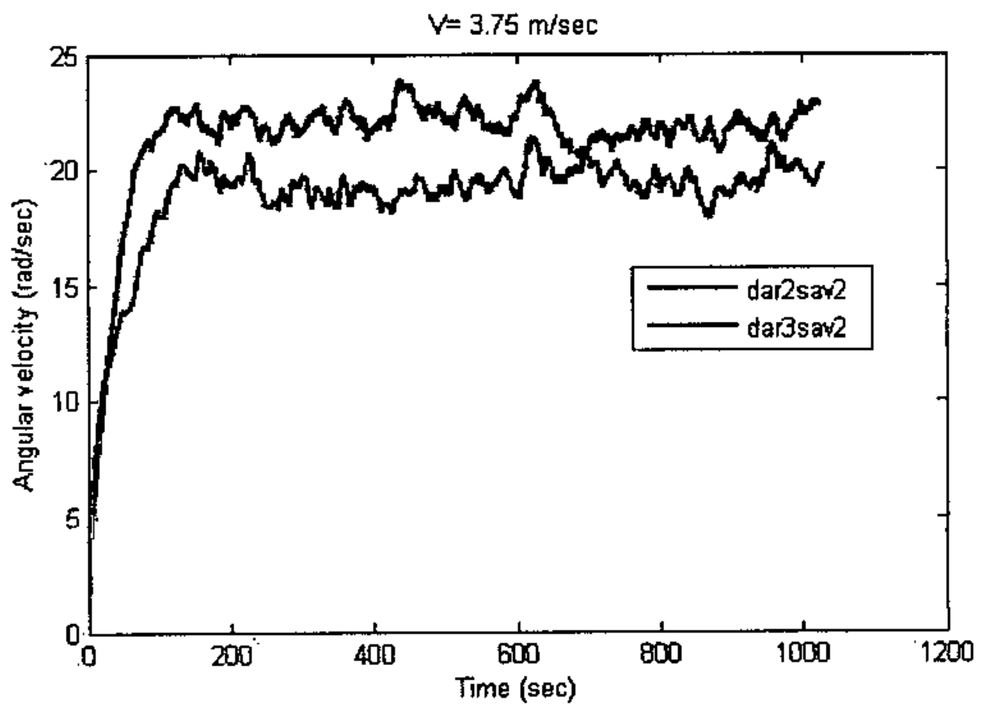
الشكل(6-12) نتائج اختبار النموذجين dar2sav1 و dar3sav1 عند سرعة الهواء 3.75m/sec



الشكل(6-13) نتائج اختبار النموذجين dar2sav2 و dar3sav2 عند سرعة الهواء 1m/sec



الشكل(6-14) نتائج اختبار النموذجين dar2sav2 و dar3sav2 عند سرعة الهواء 2.5m/sec



الشكل(6-15) نتائج اختبار النموذجين dar2sav2 و dar3sav2 عند سرعة الهواء 3.75m/sec

6-2- مناقشة نتائج التجارب:

يتبين من خلال نتائج التجارب التي أجريت على النماذج الثمانية لدوار سافونيوس/داريوس ما يلي:

1- بينت منحنيات المجموعة الأولى من التجارب ضعفاً في عزم الإقلاع لدوار داريوس بمفرده من خلال نتائج اختبار النموذج dar3 وهذا ما يتطابق مع نتائج النمذجة الحاسوبية, فقد كان الدوار يستغرق وقتاً طويلا للوصول إلى السرعة الوسطية التي يتذبذب حولها.

2- بينت منحنيات المجموعة الأولى من التجارب أيضاً عزم الإقلاع الكبير الذي يتميز به دوار سافونيوس وذلك بالنسبة للنموذجين المختبرين sav1 وsav2, إذ أن دوار سافونيوس كان يصل إلى السرعة الوسطية التي يتذبذب حولها خلال زمن وجيز جداً بالمقارنة بالزمن الذي كان يستغرقه دوار داريوس بمفرده.

3- بينت منحنيات المجموعة الأولى من التجارب أن عملية ربط دوار سافونيوس مع دوار داريوس قد زادت من عزم إقلاع دوار داريوس بشكل ملحوظ دون أن تؤثر سلباً على السرعة الوسطية التي يتذبذب حولها الدوار وذلك في حالة اللاحمل.

4- بينت منحنيات المجموعة الأولى من التجارب أن عزم الإقلاع للدوار المطوّر سافونيوس/داريوس أقل من عزم الإقلاع لدوار سافونيوس بمفرده ويعود ذلك لسببين: الأول أن الريشات تمارس نوع من الإعاقة بُعيد الإقلاع مباشرة فتعيق عمل دوار سافونيوس, أما السبب الثاني أنه بعد الإقلاع عندما تكون الريشات قد بدأت بالعمل فتسبب نقصان بسرعة الهواء ضمن الدوار عن سرعته قبل الدوار وذلك بسبب زيادة معامل التحريض مع زيادة نسبة السرعة المحيطية لدوار داريوس وبالتالي فإن دوار سافونيوس عندما يعمل ضمن ريشات دوار داريوس وهي بحالة عمل فإنه يتعرض لسرعات هواء أقل مما يتعرض لها في حالة عدم وجود الريشات مما يضعف عزم إقلاعه.

5- بينت منحنيات المجموعة الأولى من التجارب أيضاً أن النموذج dar3sav1

استقر في النهاية عند سرعة وسطية أكبر من السرعة الوسطية التي استقر عندها كل من النموذجين dar3 وdar3sav2, أي أنه يجب اختيار أبعاد دوار سافونيوس المتناسبة مع أبعاد دوار داريوس لما لذلك تأثير على أداء الدوار خاصة فيما بعد الإقلاع وعند الوصول لمرحلة الاستقرار. فعند إجراء عملية تقسيم قطر دوار سافونيوس على قطر دوار داريوس في النموذج dar3sav1 يكون ناتج القسمة (0.28), أما عند إجراء نفس عملية القسمة بالنسبة النموذج dar3sav2 يكون الناتج (0.36), فيمكن بالتالي الاستنتاج من منحنيات المجموعة الأولى من التجارب أن نسبة قطري دواري سافونيوس و داريوس عند القيمة (0.28) أفضل منها عند القيمة (0.36).

6- بينت منحنيات المجموعة الثانية من التجارب سوء أداء النموذج dar2 في أثناء كافة مراحل العمل عند سرعات الهواء الأقل من السرعة (3 m/sec) لدرجة أن دوار سافونيوس بمفرده في النموذج sav1 وsav2 أظهر أداءً أفضل من دوار داريوس الثنائي الريشات في النموذج dar2.

7- بينت منحنيات المجموعة الثانية من التجارب تحسناً ملموساً في أداء النموذج dar2 عند السرعة (3.75 m/sec) مما يشير إلى إمكانية تحسن أداء هذا النموذج عند تعرضه لسرعات هواء أكبر, إلا أنه وبحسب مجمل النتائج المدروسة فإن النموذج dar2 لا يناسب العمل عند سرعات هواء قليلة دون السرعة(3m/sec).

8- بينت منحنيات المجموعة الثانية من التجارب فعالية عملية الربط بين دواري سافونيوس/ داريوس إذ ظهر تحسن أيضا في أداء دوار داريوس ثنائي الريشات عند ربطه بدوار سافونيوس سواء في مرحلة الإقلاع أو عند الوصول للسرعة الوسطية التي تذبذب حولها. إلا أن استخدام دوار داريوس ثلاثي الريشات عند سرعات هواء بعد ربطه مع دوار سافونيوس أظهر أداءً أفضل من دوار داريوس ثنائي الريشات المربوط مع دوار سافونيوس وهذا ما تؤكده نتائج المجموعة الثالثة من الاختبارات وذلك ضمن مجال قيم سرعات الهواء المطبقة.

9- تشير منحنيات المجموعة الثالثة من التجارب إلى حدوث تحسن في أداء للنموذج dar2 ووصوله لسرعة دوران وسطية يتذبذب حولها تساوي سرعة الدوران الوسطية للنموذج dar3 وذلك عند سرعة الهواء (3.75 m/sec). أي أن أداء دوار داريوس ثنائي الريشات بمفرده عند سرعات هواء تزيد عن (3m/sec) وفي مرحلة الاستقرار يشابه إلى حد كبير أداء دوار داريوس ثلاثي الريشات, إلا أن هذا التشابه في مرحلة الاستقرار زال بوجود دوار سافونيوس إذ أصبح أداء دوار داريوس ثلاثي الريشات في النموذجين dar3sav1 وdar3sav2 أفضل من أداء النمونجين dar2sav1 وdar2sav2 في مرحلة الاستقرار و هذا يدل على أن دوار سافونيوس سبب نوع من الإعاقة عندما كان المجال أمامه مفتوحاً عند توضعه بين ريشتي دوار داريوس.

10- يعتبر النموذج dar3sav1 أفضل النماذج المختبرة عند مختلف سرعات الهواء والتي لا تزيد عن القيمة (4 m/sec).

6-3- المقترحات والتوصيات:

بعد إجراء هذا البحث المتضمن نمذجة رياضية لدوار سافونيوس ودوار داريوس وبعد تصنيع دوار يعمل بمبدأ سافونيوس /داريوس والذي أظهرت نتائج الاختبار العملية فعالية هذه الطريقة في الربط تم التوصل لمجموعة من المقترحات والتوصيات وهي :

1- يجب البحث لتحديد أبعاد كلا الدوارين حيث يحصل عندهما أكبر فعالية من هذا الربط وتحديد الحالة المثلى لتوضع دوار سافونيوس بالنسبة لدوار داريوس.

2- البحث في تأثير شكل المقاطع الإنسيابية للريشات على دوار سافونيوس/داريوس وتحديد أكثر المقاطع ملائمة لتحقيق أفضل مردود ممكن.

3- البحث في القوى والأحمال الناجمة عن هذا الربط والمؤثرة على محور الدوران والمحامل الدحروجية ودراسة اهتزازات هذا الدوار للاستفادة من نتائج هذا البحث في وضع أسس تصميمية ميكانيكية لتصنيع دوارات ذوات قياسات أكبر وتجريبها في الطبيعة بمواجهة الرياح.

4- دراسة هذا الدوار عند سرعات رياح كبيرة تصل حتى (6 m/sec) وتحديد تأثير دوار سافونيوس على عمل دوار داريوس عند تلك السرعات. حيث أن هذا البحث لم يتطرق لدراسة الدوار عند سرعات كبيرة لأن هذه الدراسة تطرقت فقط لتصميم نموذج يناسب المناطق التي لا تتوافر فيها سرعات رياح كبيرة.

6- دراسة دوار سافونيوس/داريوس بحالة الحمل وتحديد أدائه مع التحميل الجزئي و الكامل.

7- تزويد كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية في جامعة البعث بمخبر خاص يخدم أبحاث طاقة الرياح يتضمن نفق ريحي لا تقل مساحة مقطعه عن($3\times3\ m^2$) تصل فيه سرعة الهواء حتى (8m/sec) وأن يجهز المخبر بكل أجهزة القياس من مقاييس سرعة دوران وعزم إقلاع وقياس سرعة الهواء مع إمكانية الربط مع الحاسب.

المراجع

المراجع العربية:

/1/. مجموعة من المؤلفين والدارسين,1998,أطلس الرياح في الجمهورية العربية السورية. المديرية العامة للأرصاد الجوية– دمشق.

/2/. العبود, نايف,2008, طاقة الرياح. محاضرات ماجستير هندسة الطاقات البديلة في كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية في جامعة البعث–حمص.

/3/. الناصر, وهيب, 2000, سلسلة الحقائب التعليمية التدريبية في مجال الطاقات المتجددة. المنظمة العربية للتربية و الثقافة و العلوم– تونس.

/4/. محمود,ظافر,2006, احترفMATLAB7.دار شعاع للنشر– سورية.

المراجع الأجنبية:

/5/. GINSBERG,J And GENIN,J,1984,Statics and Dynamics. John wiley and Sons Ltd-USA.

/6/. MANWELL,J And McGWAN,J And ROGERS,A,2002-Wind Energy Explained. John Wiley and Sons Ltd-USA.

/7/. MITTAL,N,2001, Investigation of Performance Characteristics of Novel VAWT. M.Sc.Thesis,University of Strathclyde-Scotland,U.K.

المواقع الالكترونية:

/8/. WILSON,P And LISSMAN,P,1974-Applied Aerodynamics of Wind PowerMachines.http://wind.nrel.gov/designcodes/papers/WilsonLissaman_AppAeroOfWindPwrMach_1974.pdf,116P.

/9/. GOPAL,B And REDDY,B,1976-The Darrieus Wind Turbine: An Analytical PerformanceStudy.http://etd.lib.ttu.edu/theses/available/etd-08072009-31295001257863/unrestricted/31295001257863.pdf,65P.

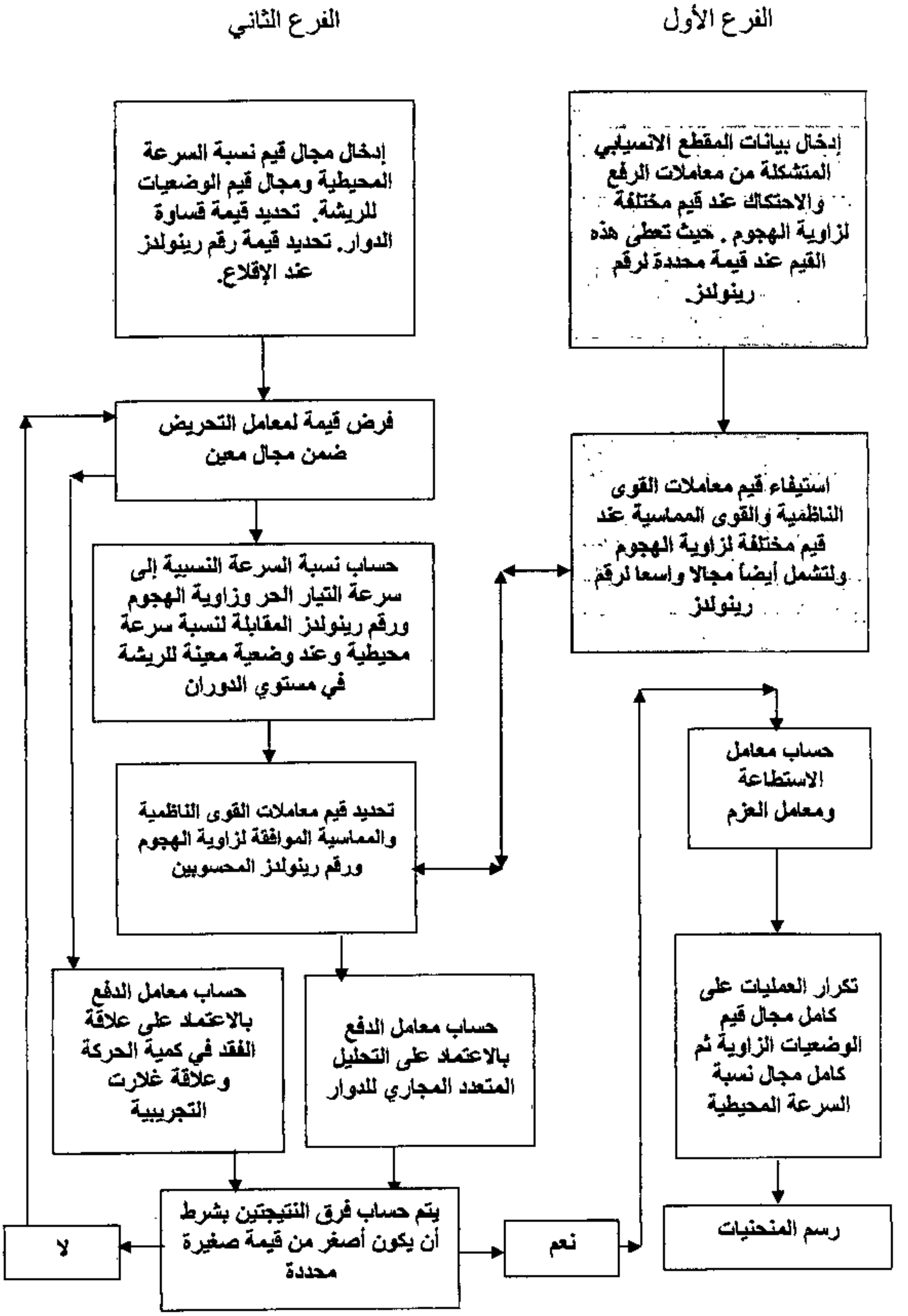
/10/. LIAN,D And LEE,J And KIM,Y,2008-Power Prediction of Darrieus Type Wind Turbine Considering Real Air Velocity on The Wind Turbine Blade.http://www.ewec2008proceedings.info/ewec2008/allfiles2/184_EWEC2008fullpaper.pdf,10P.

/11/. http://www.cyberiad.net/library/airfoils/foildata/n0018cl.htm
/12/. http://www.cyberiad.net/library/airfoils/foildata/n0018cd.htm
/13/. http://www.cyberiad.net/library/airfoils/foildata/n0015cl.htm
/14/. http://www.cyberiad.net/library/airfoils/foildata/n0015cd.htm
/15/. http://www.cyberiad.net/library/airfoils/foildata/n0012cl.htm
/16/. http://www.cyberiad.net/library/airfoils/foildata/n0012cd.htm
/17/. http://www.mathwork.com
/18/. http://www.windpower.org
/19/. http://www.gwec.net
/20/. http://www.ceoe.udel.edu/WindPower/ResourceMap/index-world.html
/21/. http://www.esyria.sy/equnaytra
/22/. http://www.nrel.net
/23/. http://www.profili2.com
/24/. http://www.windfinder.com/wind/windspeed.htm

الملحق (أ)

خاص بالنمذجة الحاسوبية لأداء كل من دوار سافونيوس ودوار داريوس

المخطط الخوارزمي للنمذجة الحاسوبية لدوار داريوس



رقم رينولدز		المقطع الإنسيابي		
1000000		naca0012		
معامل القوة الناظمية	معامل القوة المماسية	معامل الاحتكاك	معامل الرفع	زاوية الهجوم
Cnorm	Ctang	Cd	Cl	α
0	-0.0065	0.0065	0	0
-0.1101	-0.0046792	0.0066	0.11	1
-0.2201	0.00088203	0.0068	0.22	2
-0.32992	0.010181	0.0071	0.33	3
-0.43947	0.022912	0.0078	0.44	4
-0.5487	0.03887	0.0091	0.55	5
-0.65744	0.058944	0.0101	0.66	6
-0.7656	0.082921	0.011	0.77	7
-0.87309	0.11069	0.0119	0.88	8
-0.9563	0.1379	0.0134	0.9661	9
-1.0378	0.16806	0.0147	1.0512	10
-1.0924	0.19584	0.0162	1.1097	11
-1.1004	0.2155	0.018	1.1212	12
-1.0263	0.21642	0.02	1.0487	13
-0.86369	0.19246	0.0222	0.8846	14
-0.69292	0.1603	0.0245	0.7108	15
-0.61781	0.043995	0.128	0.606	16
-0.63233	-0.048232	0.231	0.5906	17
-0.65136	-0.053329	0.252	0.603	18
-0.6881	-0.052857	0.274	0.6334	19
-0.73268	-0.049388	0.297	0.6716	20
-0.78331	-0.042083	0.32	0.7162	21
-0.83473	-0.033763	0.344	0.7613	22
-0.88951	-0.023291	0.369	0.8097	23
-0.9449	-0.010591	0.394	0.8589	24
-1.0016	0.0036375	0.42	0.9093	25
-1.06	0.020763	0.446	0.9618	26
-1.0775	0.018153	0.473	0.9683	27
-1.1405	0.00026552	0.57	0.9878	30
-1.2628	-0.02522	0.745	1.02	35
-1.4149	-0.013764	0.92	1.075	40
-1.5274	0.0070711	1.075	1.085	45
-1.5992	0.015699	1.215	1.04	50
-1.6553	0.019021	1.345	0.965	55
-1.7106	0.022772	1.47	0.875	60
-1.7507	0.027702	1.575	0.765	65
-1.7869	0.041337	1.665	0.65	70
-1.8092	0.048401	1.735	0.515	75
-1.8172	0.055285	1.78	0.37	80
-1.8123	0.062282	1.8	0.22	85
-1.8	0.07	1.8	0.07	90

رقم رينولدز		المقطع الإنسيابي		
1000000		naca0015		
معامل القوة الناظمية	معامل القوة المماسية	معامل الاحتكاك	معامل الرفع	زاوية الهجوم
Cnorm	Ctang	Cd	Cl	α
0	-0.0074	0.0074	0	0
-0.11011	-0.0055791	0.0075	0.11	1
-0.22013	0.000082519	0.0076	0.22	2
-0.32996	0.0093817	0.0079	0.33	3
-0.43951	0.022413	0.0083	0.44	4
-0.5487	0.03887	0.0091	0.55	5
-0.65744	0.058944	0.0101	0.66	6
-0.76561	0.082822	0.0111	0.77	7
-0.84388	0.10588	0.0126	0.8504	8
-0.9293	0.13321	0.0138	0.9387	9
-1.0013	0.16113	0.0152	1.0141	10
-1.0522	0.18741	0.0168	1.0686	11
-1.077	0.20991	0.0186	1.0971	12
-1.0722	0.2265	0.0205	1.0957	13
-1.0394	0.23596	0.0225	1.0656	14
-0.98638	0.23852	0.0249	1.0145	15
-0.92722	0.23727	0.0275	0.9567	16
-0.86915	0.23404	0.0303	0.8996	17
-0.85948	0.1268	0.145	0.8566	18
-0.86243	0.021978	0.26	0.8226	19
-0.85657	0.011667	0.282	0.8089	20
-0.86205	0.00421	0.305	0.8063	21
-0.88252	0.0017219	0.329	0.8189	22
-0.91228	0.002668	0.354	0.8408	23
-0.94601	0.0063256	0.379	0.8668	24
-0.98892	0.014274	0.405	0.9023	25
-1.0348	0.024053	0.432	0.9406	26
-1.092	0.040132	0.46	0.9912	27
-1.1597	0.011366	0.57	1.01	30
-1.2628	-0.02522	0.745	1.02	35
-1.3842	-0.039476	0.92	1.035	40
-1.5026	-0.017678	1.075	1.05	45
-1.5864	0.00037839	1.215	1.02	50
-1.6495	0.01083	1.345	0.955	55
-1.7106	0.022772	1.47	0.875	60
-1.7486	0.02317	1.575	0.76	65
-1.7801	0.022543	1.665	0.63	70
-1.8053	0.033912	1.735	0.5	75
-1.8163	0.050361	1.78	0.365	80
-1.8132	0.072244	1.8	0.23	85
-1.8	0.09	1.8	0.09	90

رقم رينولدز		المقطع الإنسيابي		
1000000		naca0018		
معامل القوة الناظمية	معامل القوة المماسية	معامل الاحتكاك	معامل الرفع	زاوية الهجوم
Cnorm	Ctang	Cd	Cl	α
0	-0.0082	0.0082	0	0
-0.11013	-0.006279	0.0082	0.11	1
-0.22016	-0.00061705	0.0083	0.22	2
-0.33	0.0086827	0.0086	0.33	3
-0.43955	0.021815	0.0089	0.44	4
-0.54874	0.038472	0.0095	0.55	5
-0.65745	0.058845	0.0102	0.66	6
-0.73211	0.078306	0.0115	0.7362	7
-0.81932	0.10242	0.0126	0.8256	8
-0.89771	0.12811	0.0139	0.9067	9
-0.96296	0.15416	0.0154	0.9751	10
-1.0127	0.17954	0.017	1.0284	11
-1.047	0.20343	0.0187	1.0664	12
-1.0573	0.22297	0.0206	1.0804	13
-1.0527	0.23908	0.0227	1.0793	14
-1.0327	0.25072	0.0251	1.0624	15
-1.0297	0.1829	0.108	1.0402	16
-1.0242	0.13222	0.173	1.0181	17
-1.0207	0.081399	0.238	0.9959	18
-1.0144	0.074296	0.26	0.9833	19
-1.0086	0.067006	0.282	0.9707	20
-1.0152	0.06248	0.3055	0.9702	21
-1.0222	0.058175	0.329	0.9696	22
-1.0872	0.060086	0.405	1.0107	25
-1.0255	-0.066134	0.57	0.855	30
-1.2301	-0.048163	0.745	0.98	35
-1.3842	-0.039476	0.92	1.035	40
-1.5026	-0.017678	1.075	1.05	45
-1.5864	0.00037839	1.215	1.02	50
-1.6495	0.01083	1.345	0.955	55
-1.7106	0.022772	1.47	0.875	60
-1.7486	0.02317	1.575	0.76	65
-1.7801	0.022543	1.665	0.63	70
-1.8053	0.033912	1.735	0.5	75
-1.8163	0.050361	1.78	0.365	80
-1.8132	0.072244	1.8	0.23	85
-1.8	0.09	1.8	0.09	90

المقطع الأيروديناميكي	عدد الريشات			
naca0012	2		3	
نسبة السرعة المحيطية	معامل الاستطاعة	معامل العزم	معامل الاستطاعة	معامل العزم
λ	Cp	Ct	Cp	Ct
1.50	0.0056	0.0037	0.0082	0.0055
1.75	0.0098	0.0056	0.0146	0.0083
2.00	0.0166	0.0083	0.0249	0.0125
2.25	0.0253	0.0112	0.0370	0.0164
2.50	0.0359	0.0144	0.0531	0.0213
2.75	0.0550	0.0200	0.0817	0.0297
3.00	0.0881	0.0294	0.1336	0.0445
3.25	0.1481	0.0456	0.2357	0.0725
3.50	0.2590	0.0740	0.3911	0.1118
3.75	0.3510	0.0936	0.4597	0.1226
4.00	0.4032	0.1008	0.4770	0.1193
4.25	0.4326	0.1018	0.4770	0.1122
4.50	0.4510	0.1002	0.4692	0.1043
4.75	0.4606	0.0970	0.4591	0.0967
5.00	0.4632	0.0926	0.4458	0.0892
5.25	0.4551	0.0867	0.4289	0.0817
5.50	0.4434	0.0806	0.4061	0.0738
5.75	0.4313	0.0750	0.3827	0.0666
6.00	0.4155	0.0693	0.3502	0.0584
6.25	0.3979	0.0637	0.3173	0.0508
6.50	0.3763	0.0579	0.2775	0.0427
6.75	0.3497	0.0518	0.2307	0.0342
7.00	0.3230	0.0461	0.1815	0.0259
7.25	0.2861	0.0395	0.1276	0.0176
7.50	0.2451	0.0327	0.0625	0.0083
7.75	0.2027	0.0262	-0.0076	-0.0010
8.00	0.1566	0.0196	-0.0878	-0.0110

المقطع الأيروديناميكي	عدد الريشات			
naca0015	2		3	
نسبة السرعة المحيطية	معامل الاستطاعة	معامل العزم	معامل الاستطاعة	معامل العزم
λ	Cp	Ct	Cp	Ct
1.50	0.0094	0.0063	0.0140	0.0094
1.75	0.0168	0.0096	0.0250	0.0143
2.00	0.0282	0.0141	0.0418	0.0209
2.25	0.0431	0.0192	0.0645	0.0287
2.50	0.0662	0.0265	0.0985	0.0394
2.75	0.1032	0.0375	0.1561	0.0568
3.00	0.1697	0.0566	0.2603	0.0868
3.25	0.2471	0.0760	0.3486	0.1073
3.50	0.3033	0.0867	0.4105	0.1173
3.75	0.3541	0.0944	0.4513	0.1204
4.00	0.3943	0.0986	0.4717	0.1179
4.25	0.4232	0.0996	0.4735	0.1114
4.50	0.4441	0.0987	0.4660	0.1036
4.75	0.4551	0.0958	0.4558	0.0960
5.00	0.4580	0.0916	0.4413	0.0883
5.25	0.4516	0.0860	0.4226	0.0805
5.50	0.4392	0.0798	0.3969	0.0722
5.75	0.4256	0.0740	0.3692	0.0642
6.00	0.4075	0.0679	0.3322	0.0554
6.25	0.3865	0.0618	0.2935	0.0470
6.50	0.3610	0.0555	0.2473	0.0381
6.75	0.3290	0.0487	0.1941	0.0288
7.00	0.2974	0.0425	0.1405	0.0201
7.25	0.2558	0.0353	0.0798	0.0110
7.50	0.2095	0.0279	0.0071	0.0009
7.75	0.1611	0.0208	-0.0696	-0.0090
8.00	0.1101	0.0138	-0.1575	-0.0197

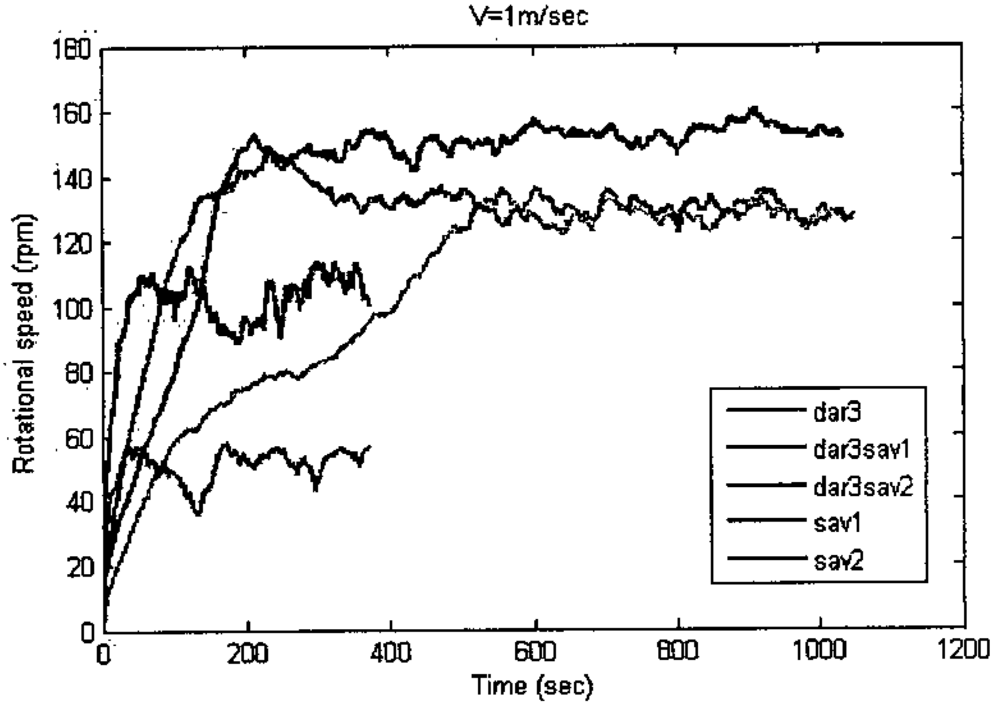
عدد الريشات				المقطع الأيروديناميكي
3		2		naca0018
معامل العزم	معامل الاستطاعة	معامل العزم	معامل الاستطاعة	نسبة السرعة المحيطية
Ct	Cp	Ct	Cp	λ
0.0086	0.0129	0.0057	0.0086	1.50
0.0131	0.0230	0.0088	0.0154	1.75
0.0206	0.0411	0.0137	0.0273	2.00
0.0313	0.0704	0.0211	0.0474	2.25
0.0421	0.1053	0.0283	0.0707	2.50
0.0570	0.1568	0.0379	0.1043	2.75
0.0781	0.2342	0.0511	0.1534	3.00
0.1046	0.3399	0.0701	0.2279	3.25
0.1155	0.4043	0.0861	0.3015	3.50
0.1180	0.4426	0.0923	0.3463	3.75
0.1159	0.4635	0.0960	0.3839	4.00
0.1104	0.4694	0.0975	0.4143	4.25
0.1026	0.4616	0.0968	0.4354	4.50
0.0947	0.4496	0.0942	0.4474	4.75
0.0871	0.4353	0.0903	0.4514	5.00
0.0790	0.4148	0.0847	0.4448	5.25
0.0702	0.3858	0.0788	0.4336	5.50
0.0617	0.3545	0.0726	0.4177	5.75
0.0524	0.3145	0.0661	0.3966	6.00
0.0434	0.2715	0.0598	0.3736	6.25
0.0340	0.2210	0.0532	0.3457	6.50
0.0243	0.1642	0.0458	0.3092	6.75
0.0151	0.1054	0.0392	0.2741	7.00
0.0054	0.0390	0.0316	0.2293	7.25
-0.0052	-0.0388	0.0236	0.1770	7.50
-0.0159	-0.1232	0.0161	0.1251	7.75
-0.0271	-0.2164	0.0086	0.0692	8.00

الملحق (ب)

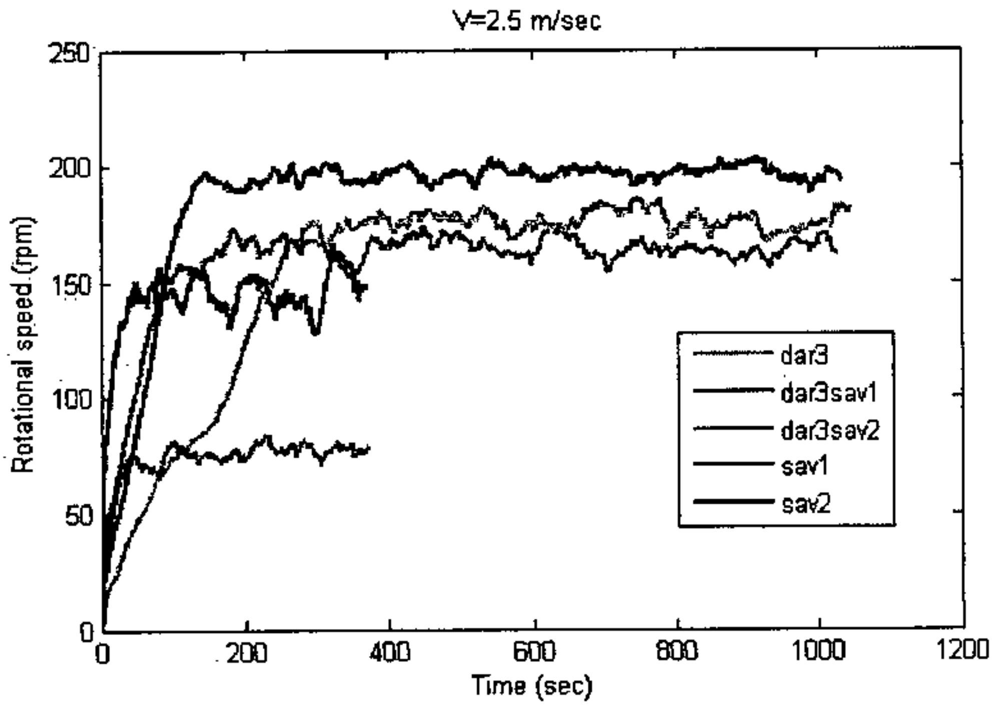
خاص بالتجارب العملية لدوار

سافونيوس/داريوس

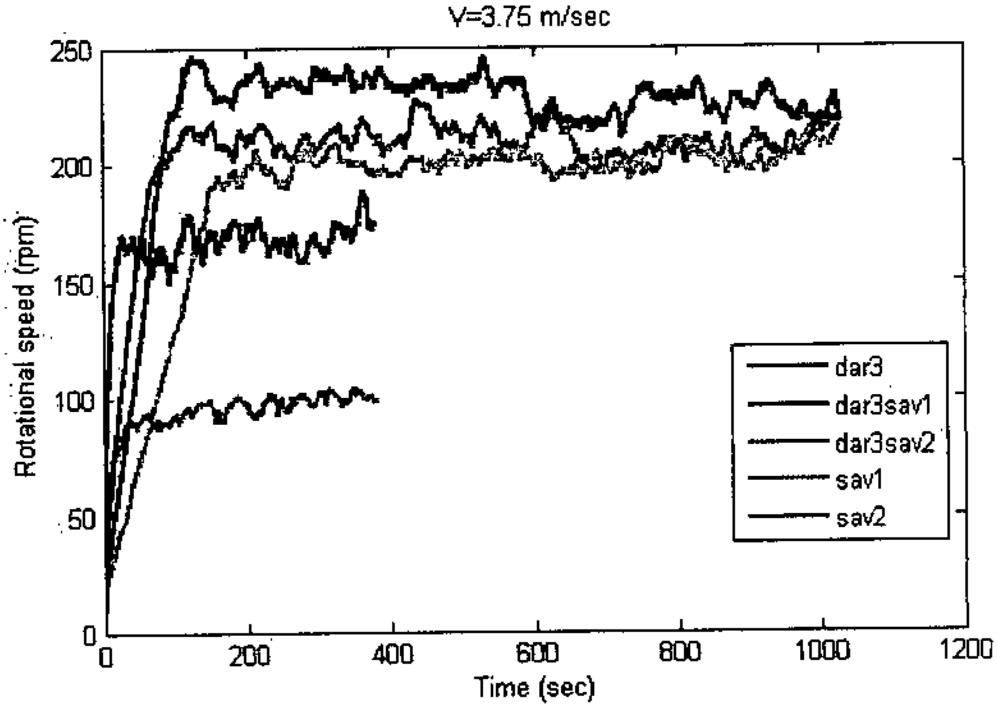
- نتائج المجموعة الأولى من التجارب:



نتائج المجموعة الأولى من التجارب عند سرعة الهواء 1m/sec

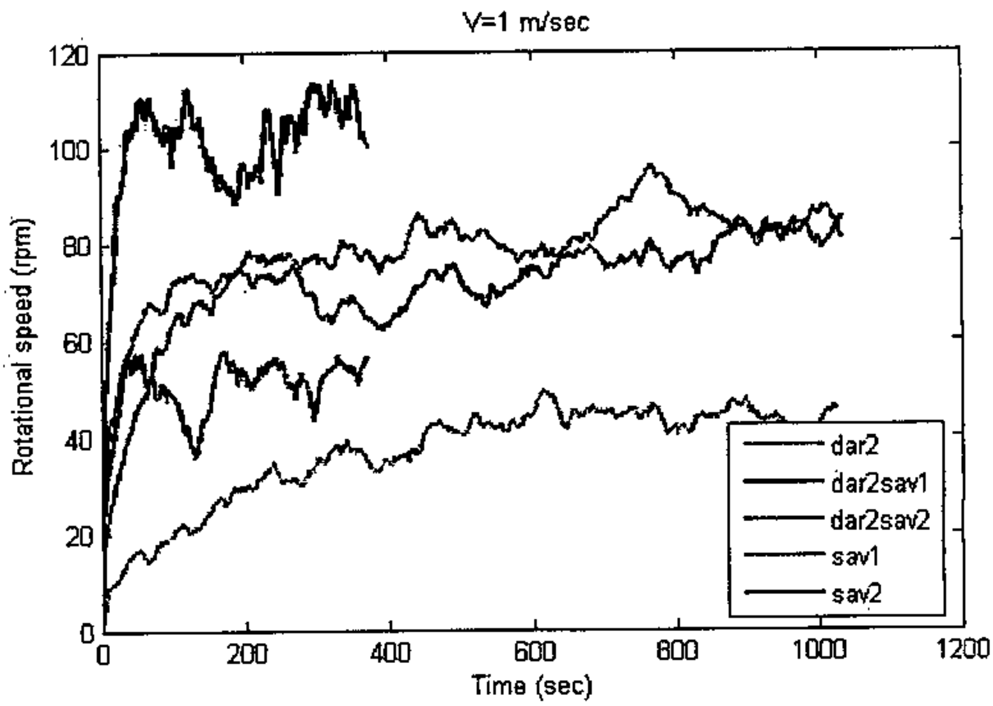


نتائج المجموعة الأولى من التجارب عند سرعة الهواء 2.5m/sec

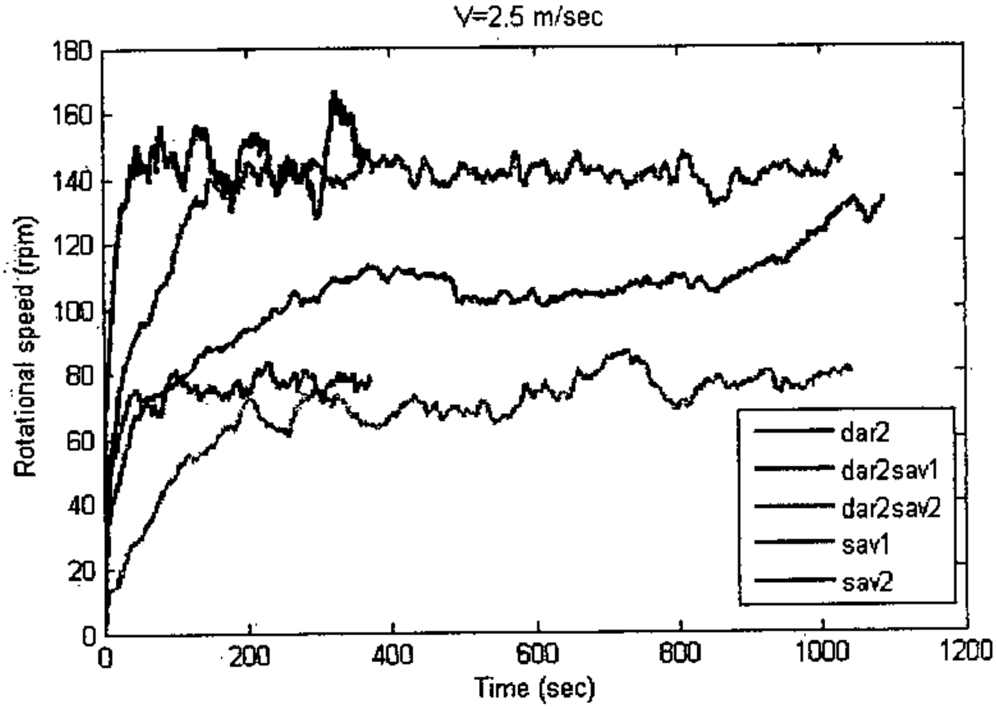


نتائج المجموعة الأولى من التجارب عند سرعة الهواء 3.75m/sec

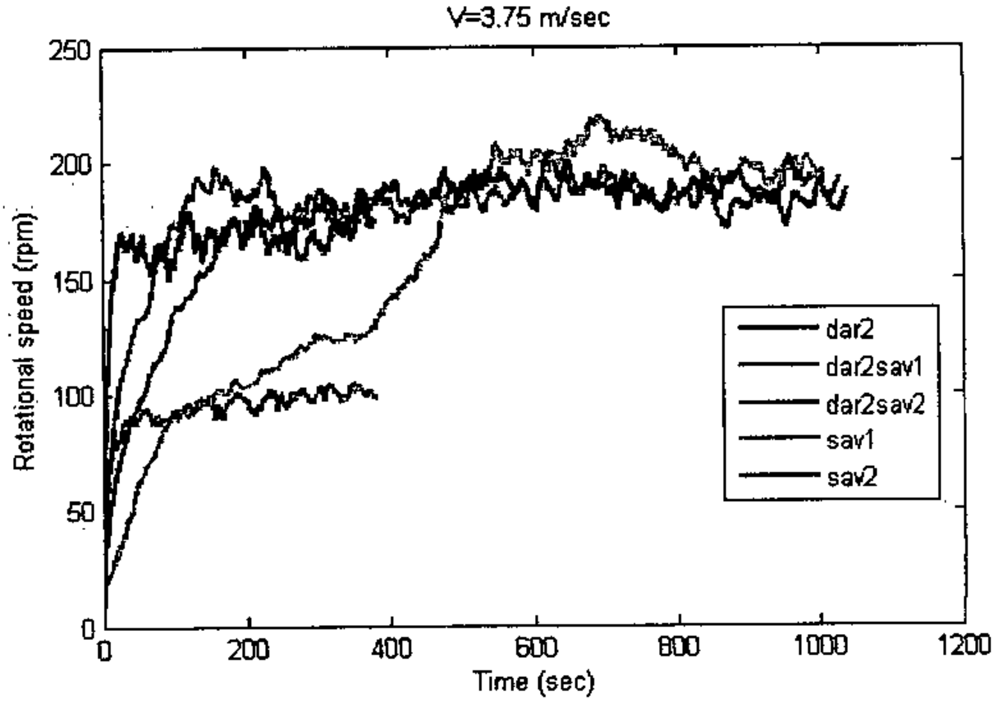
- نتائج المجموعة الثانية من التجارب:



نتائج المجموعة الثانية من التجارب عند سرعة الهواء 1m/sec

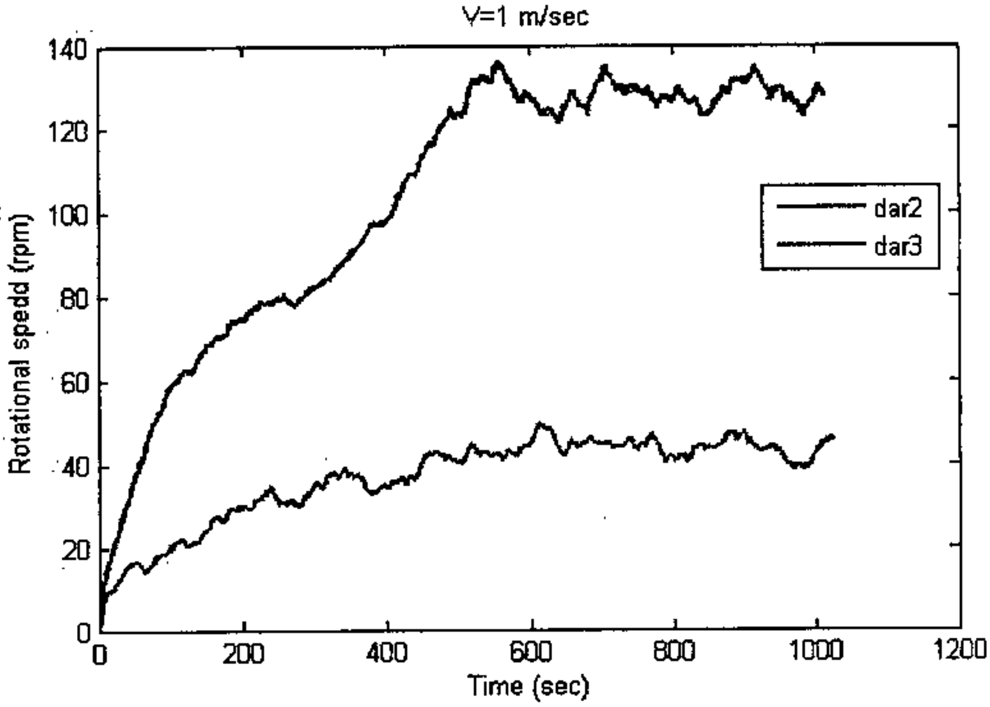


نتائج المجموعة الثانية من التجارب عند سرعة الهواء 2.5m/sec

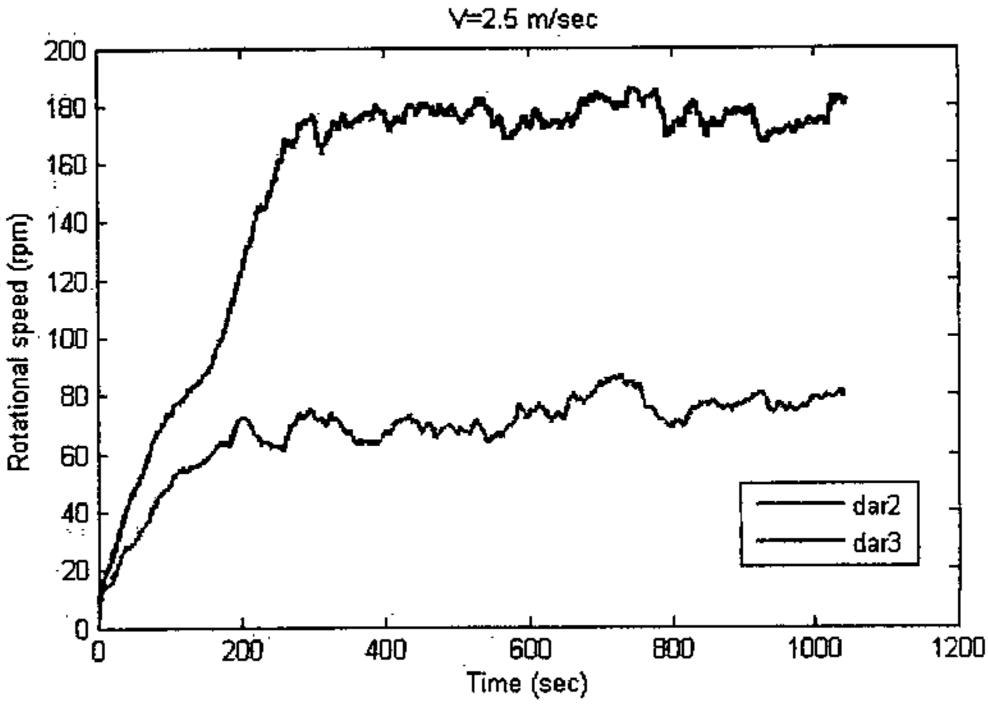


نتائج المجموعة الثانية من التجارب عند سرعة الهواء 3.75m/sec

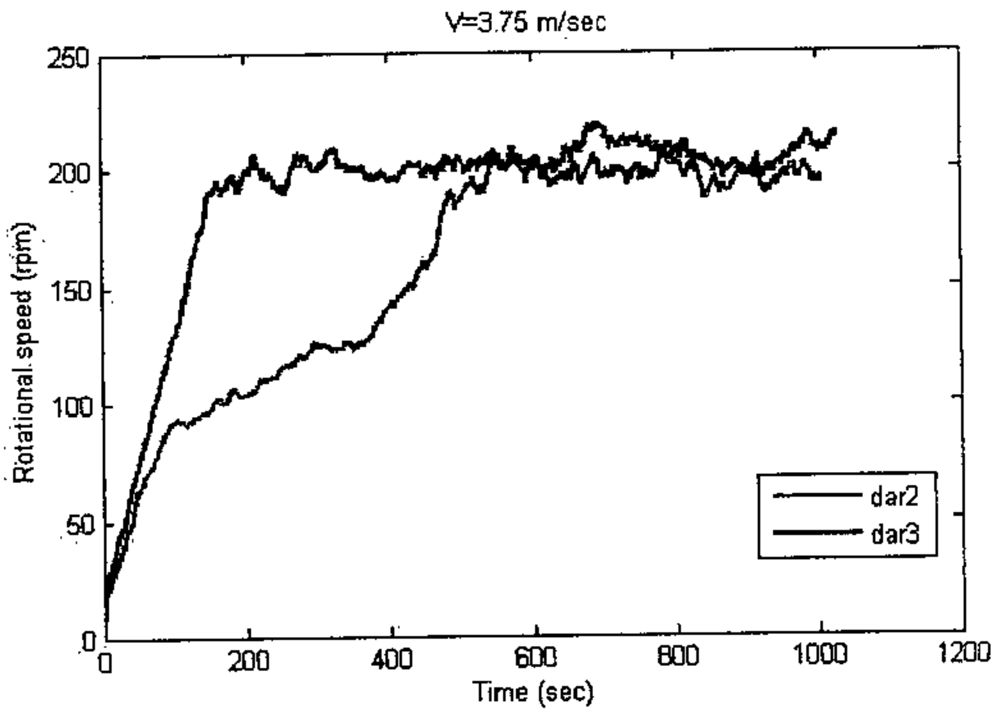
- نتائج المجموعة الثالثة من التجارب:



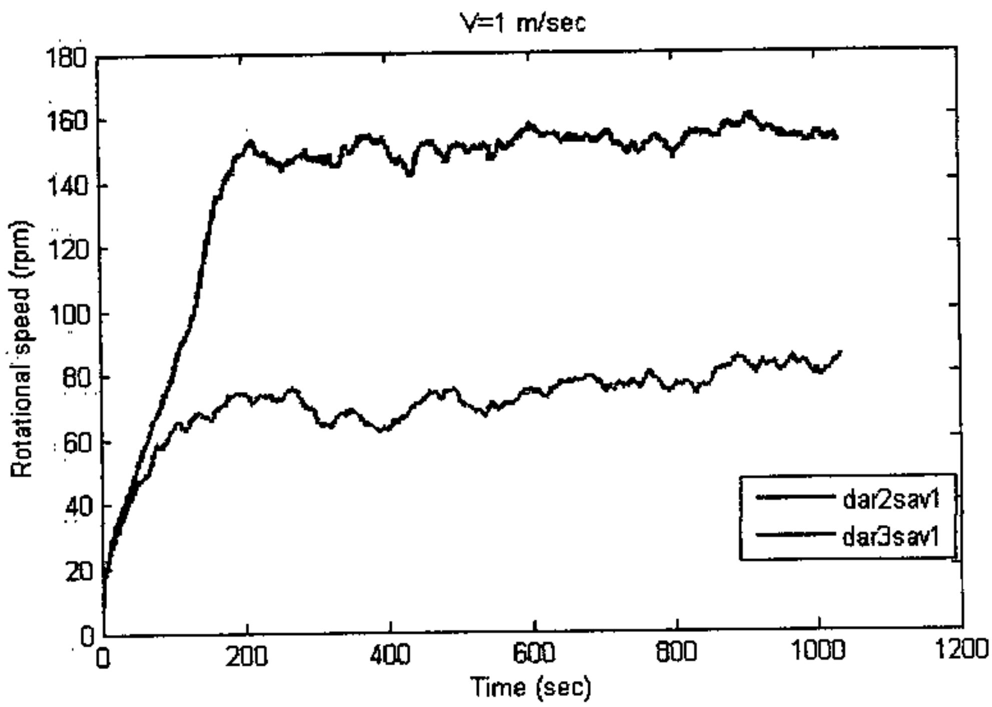
نتائج اختبار النموذجين dar2 و dar3 عند سرعة الهواء 1m/sec



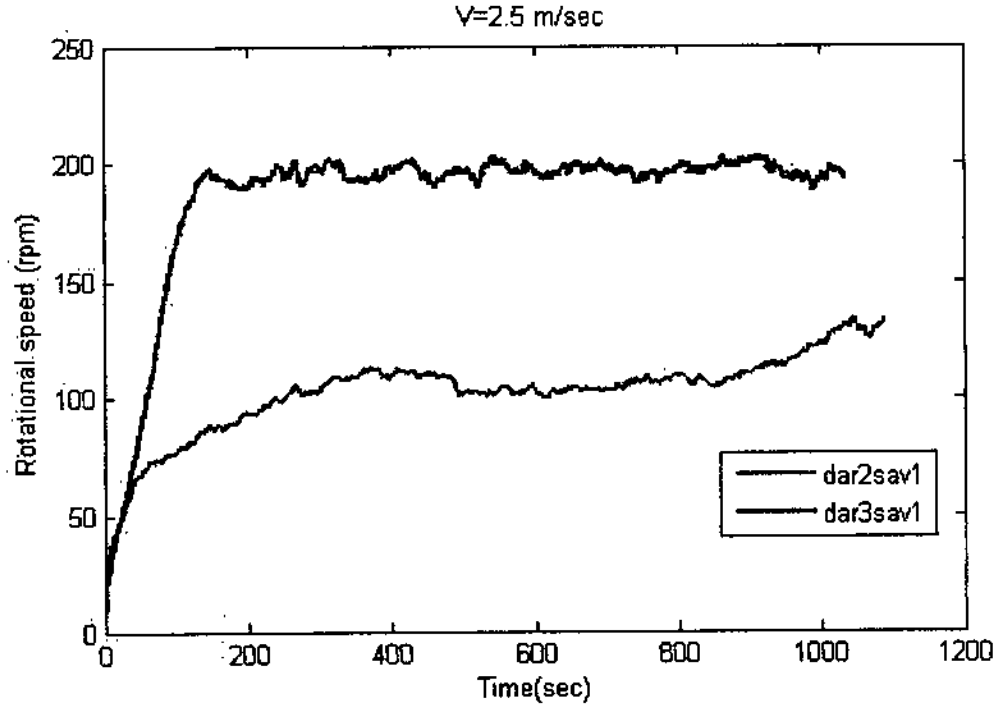
نتائج اختبار النموذجين dar2 و dar3 عند سرعة الهواء 2.5m/sec



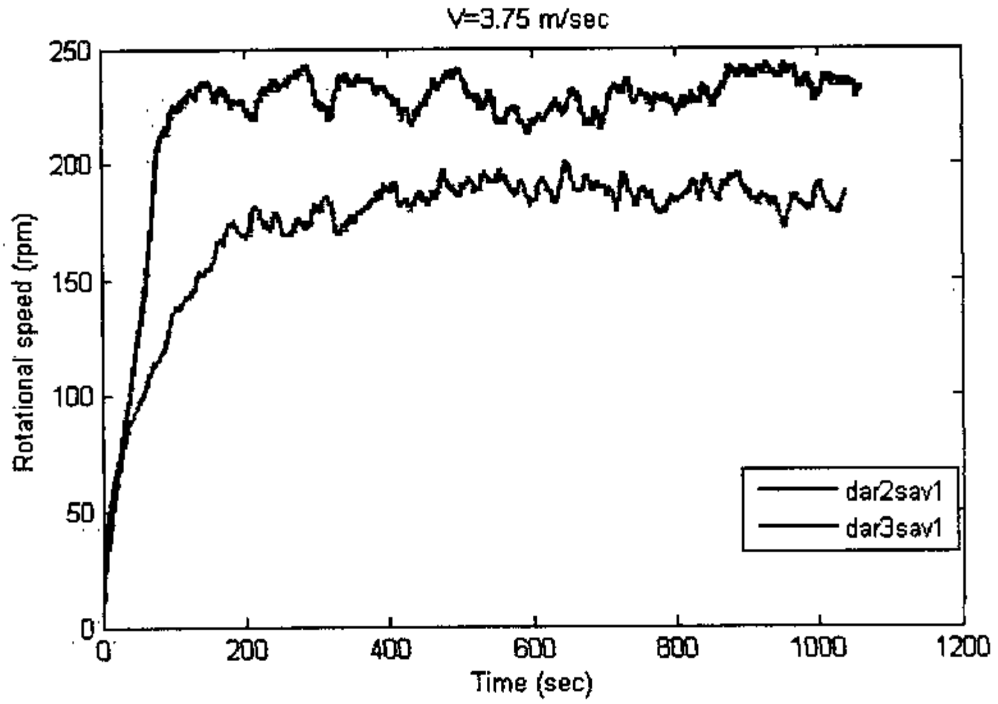
نتائج اختبار النموذجين dar2 و dar3 عند سرعة الهواء 3.75m/sec



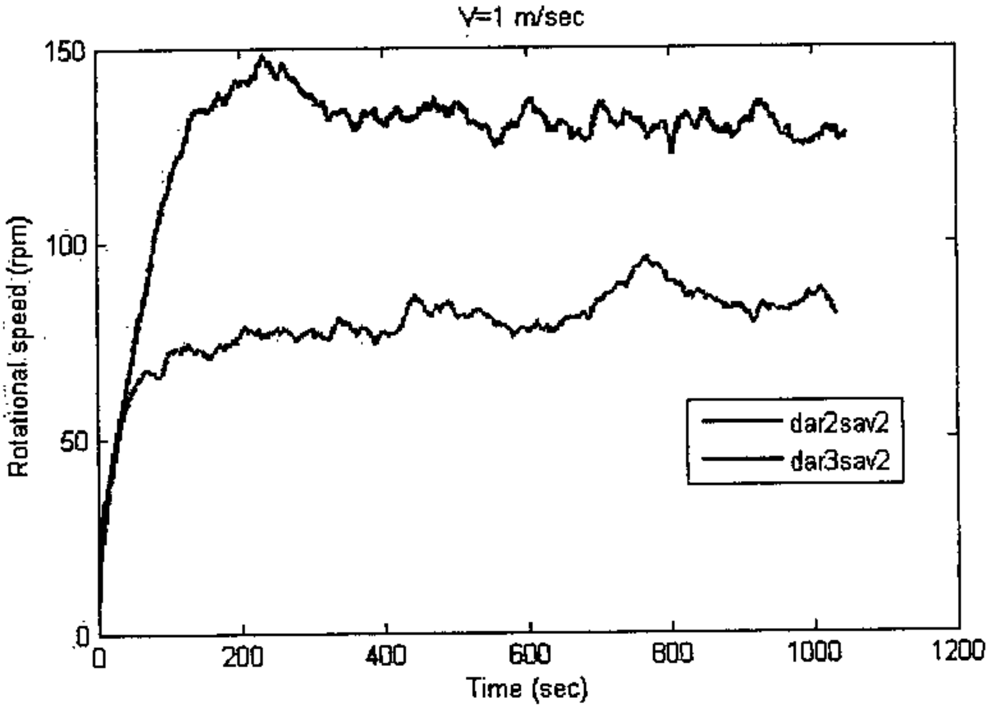
نتائج اختبار النموذجين dar2sav1 و dar3sav1 عند سرعة الهواء 1m/sec



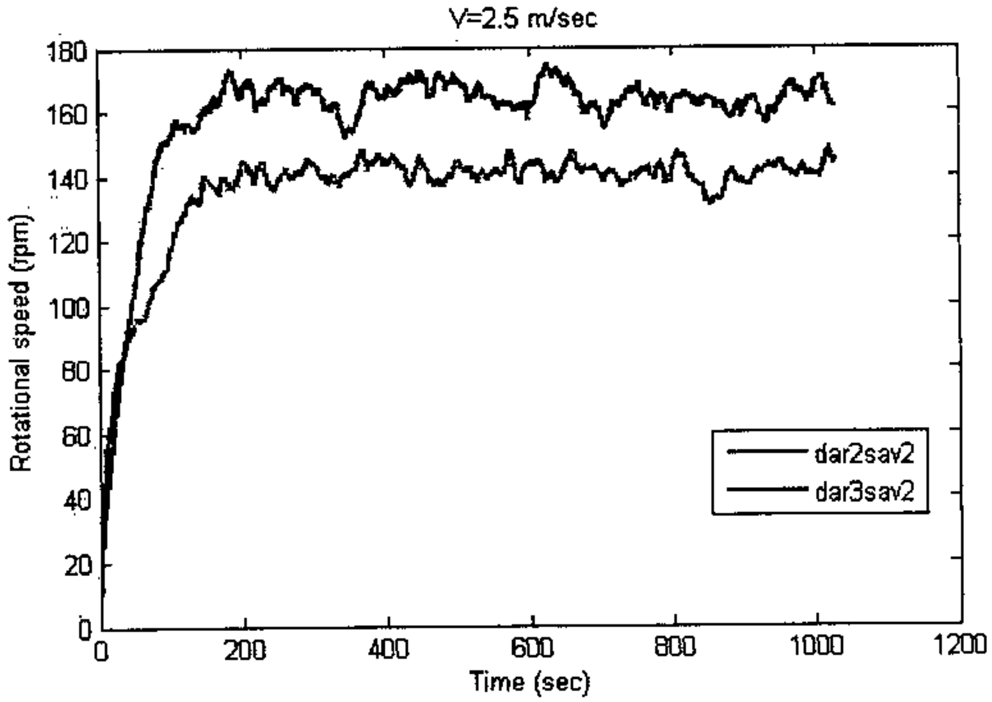
نتائج اختبار النموذجين dar2sav1 و dar3sav1 عند سرعة الهواء 2.5m/sec



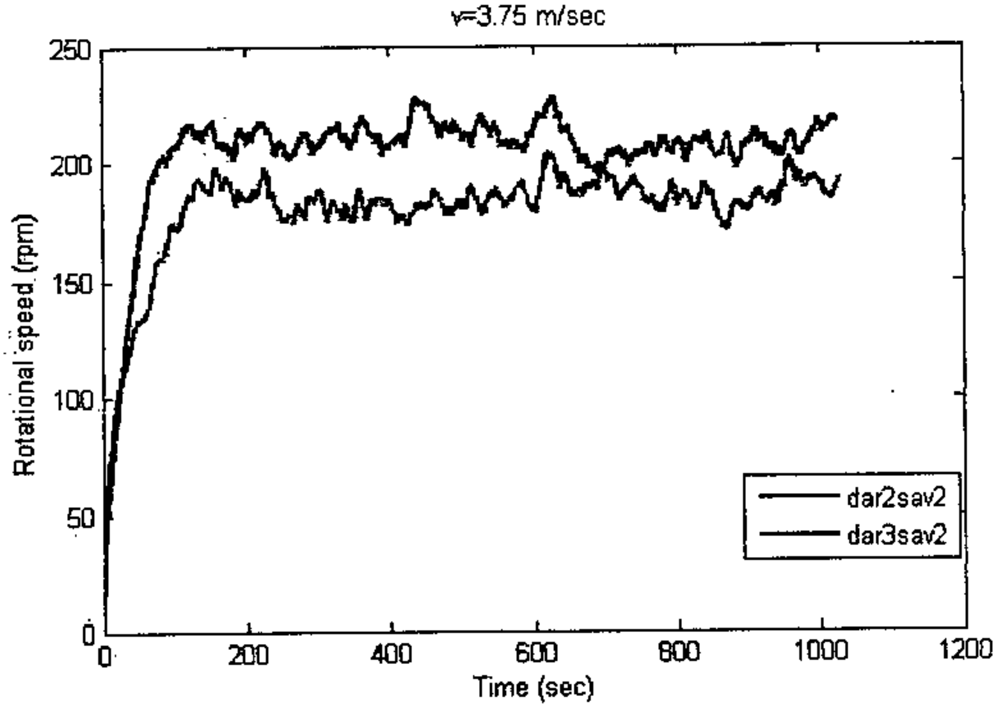
نتائج اختبار النموذجين dar2sav1 و dar3sav1 عند سرعة الهواء 3.75m/sec



نتائج اختبار النموذجين dar2sav2 وdar3sav2 عند سرعة الهواء 1m/sec



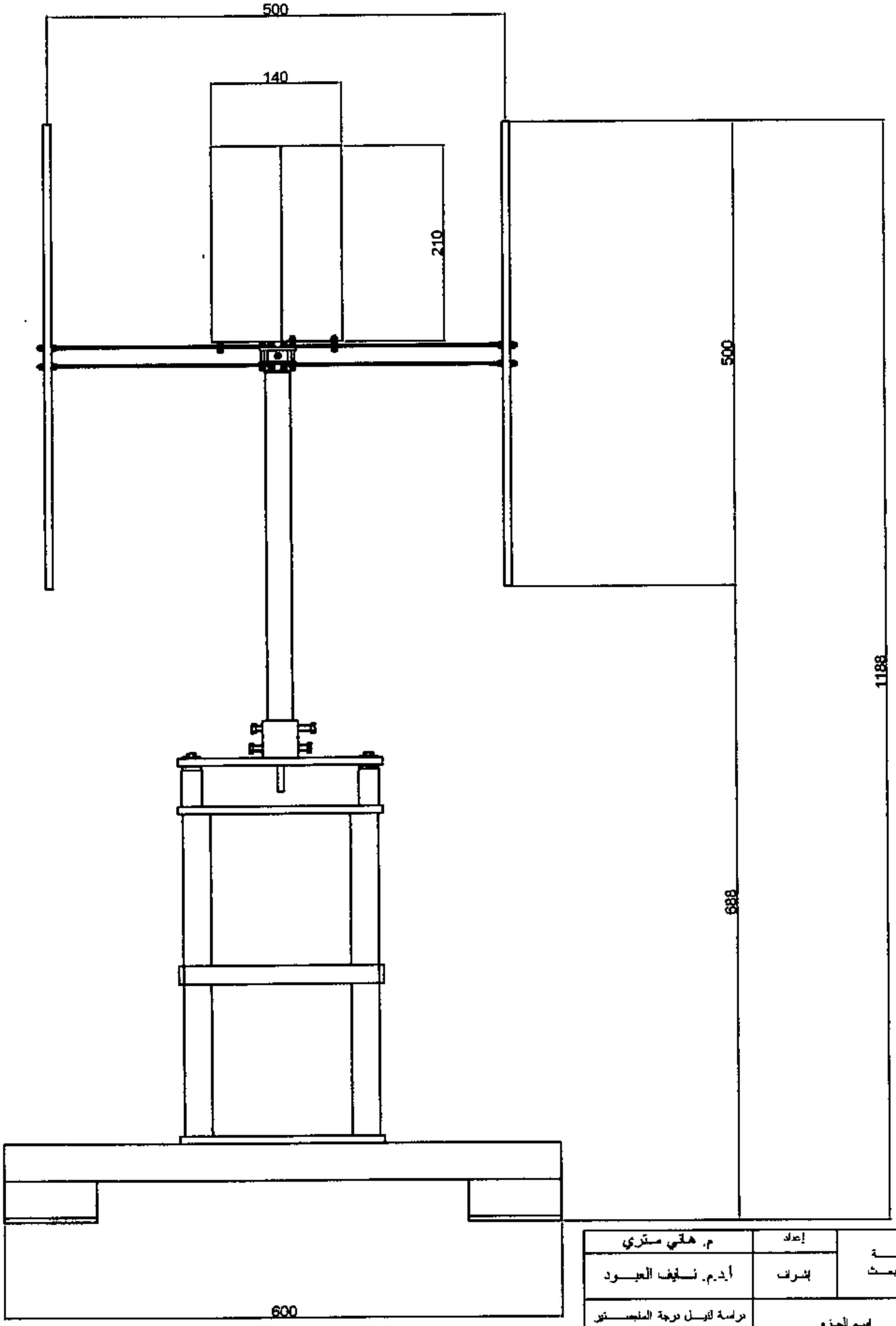
نتائج اختبار النموذجين dar2sav2 وdar3sav2 عند سرعة الهواء 2.5m/sec



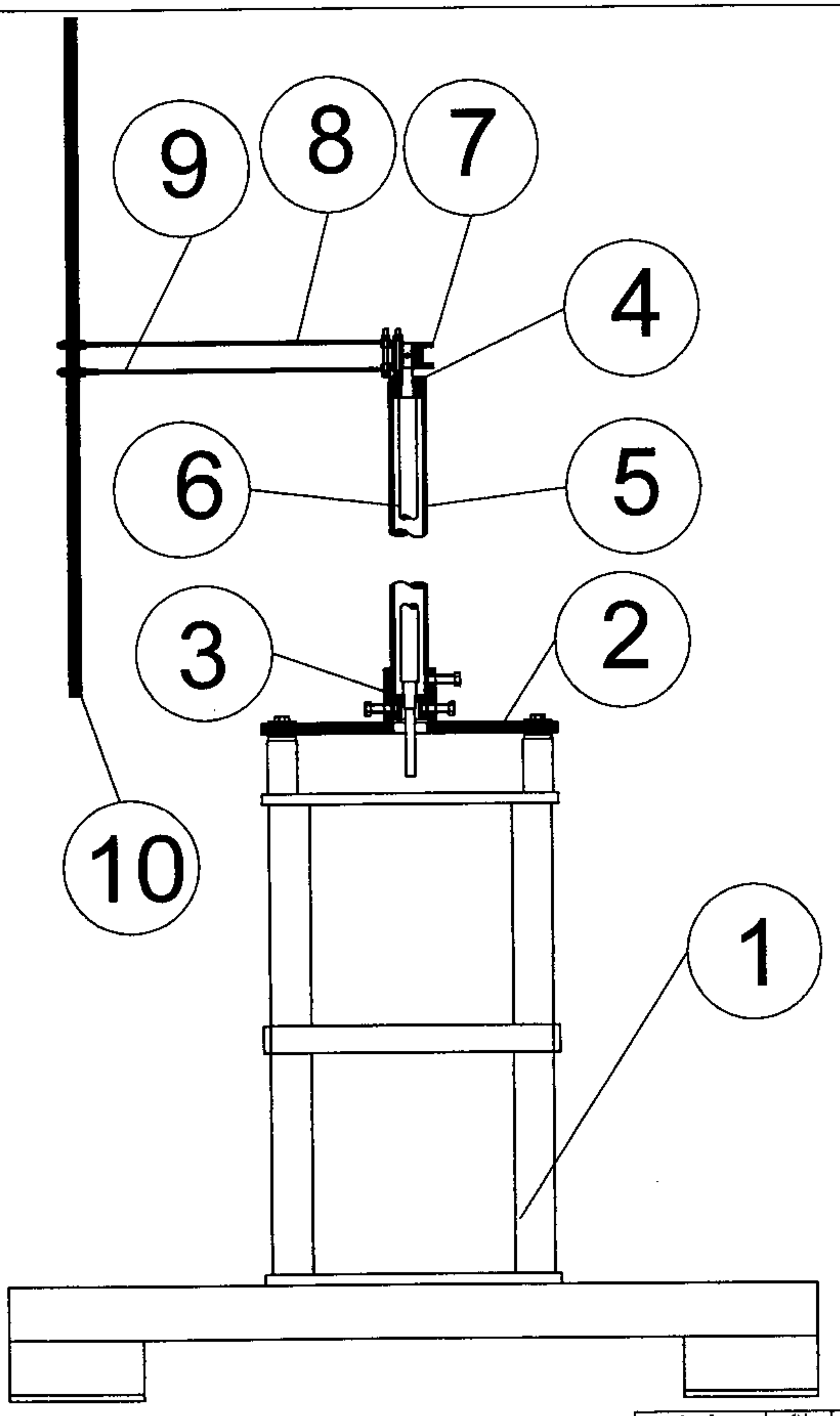
نتائج اختبار النموذجين dar2sav2 وdar3sav2 عند سرعة الهواء 3.75m/sec

الملحق (جـ)

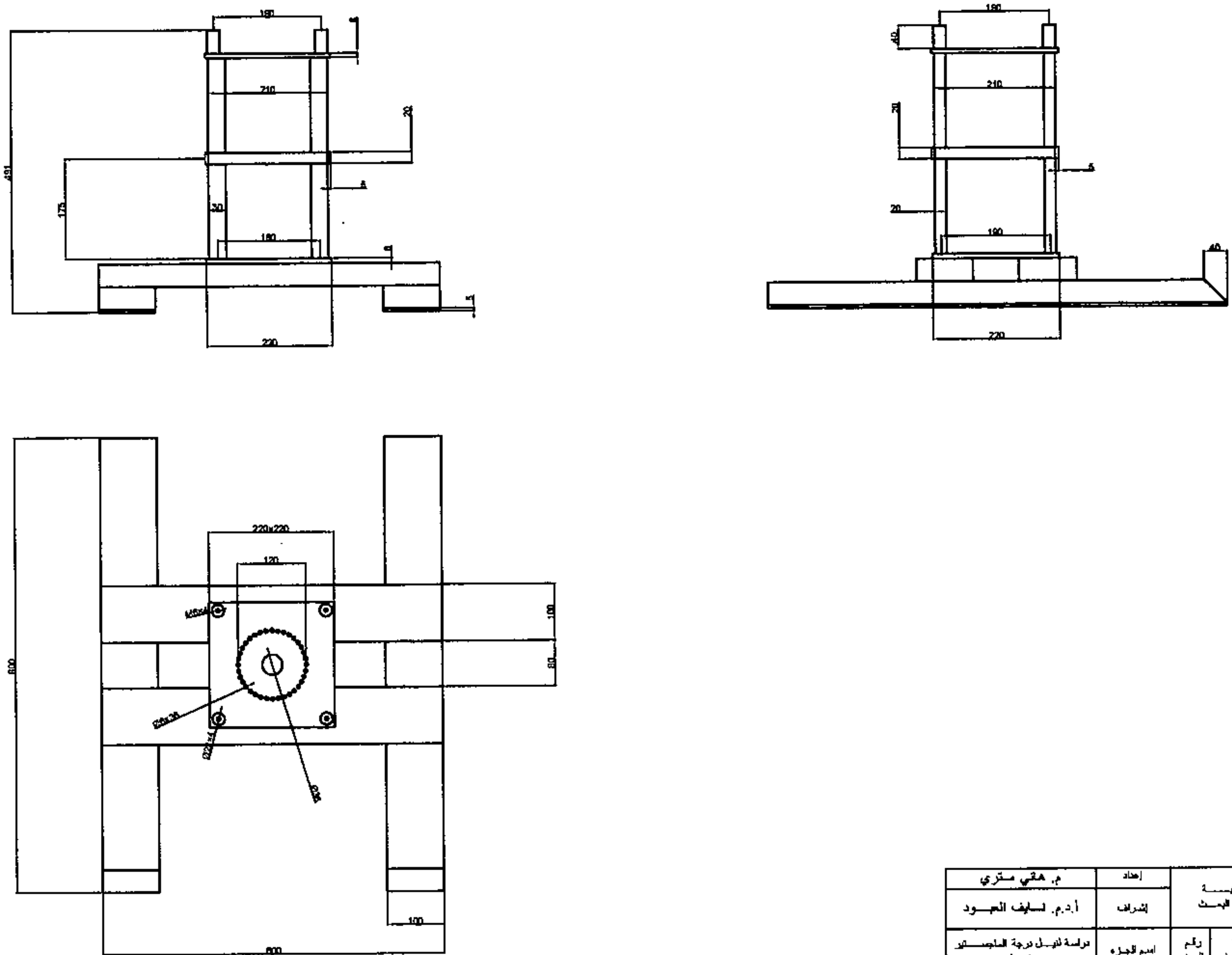
الرسومات الهندسية لدوار سافونيوس/داريوس



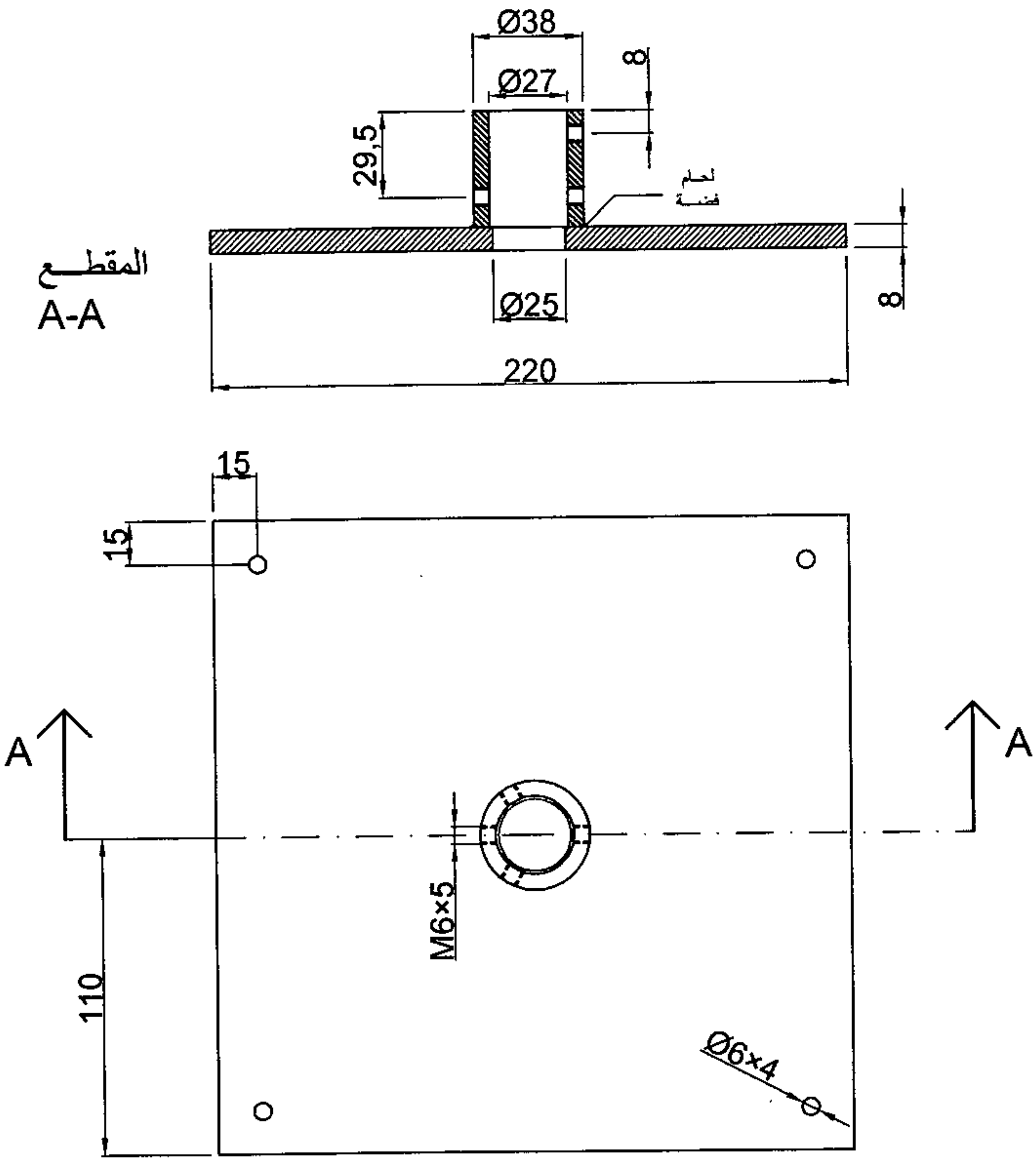
م. هاني متري	إعداد	كليـة الهندسـة الميكانيكيـة والكهربائيـة - جامعة البعـث	
أ.د.م. نـايف العبـود	إشراف		
دراسة لنيـل درجة الماجسـتير بعنـوان	اسم الجزء	الأبعـاد	المقيـاس
تطويـر دوار ريحـي يعمـل بمبـدأ سـافونيوس/داريـوس	الأبعـاد الأساسـية لدوار سـافونيوس/داريـوس ثنـائي الريشـات	mm	1/6



م. هالي ساري	إعداد	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث	
أ.د.م. نايف الحمود	إشراف		
دراسة لنيل درجة الماجستير بعنوان	اسم الجزء	الأبعاد	المقياس
تطوير دوار ريحي يعمل بمبدأ سافونيوس/داريوس	رسم تجميعي لدوار داريوس النموذج مع توضيح الأرقام لأجزاءه	mm	0.222

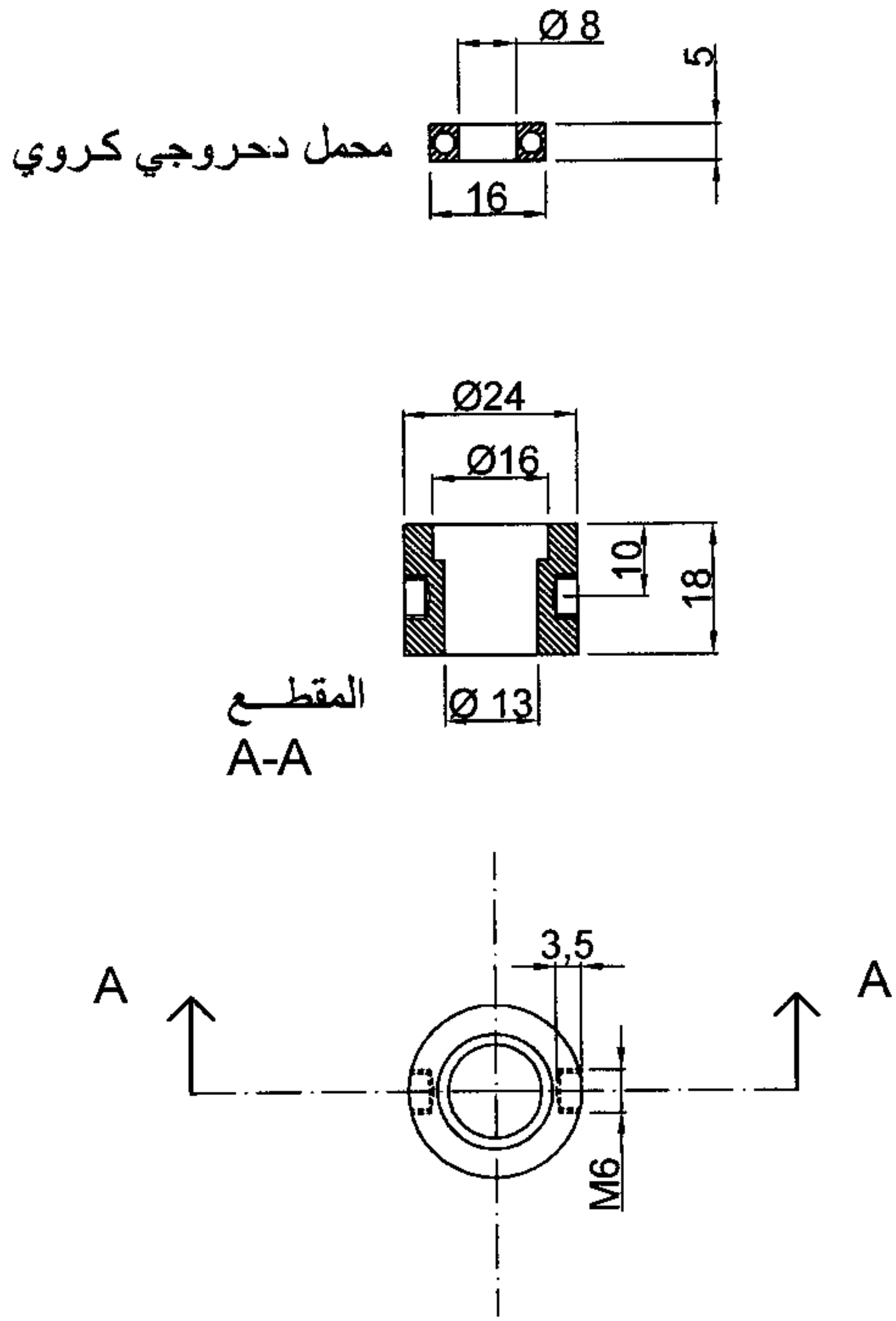


كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث				إعداد	م. هاني متري
				إشراف	أ.د.م. نايف العبود
المقياس	الأبعاد	مادة الصنع	رقم الجزء	اسم الجزء	دراسة لنيل درجة الماجستير بعنوان
1/10	mm	حديد	1	قاعدة الدوار	تطوير دوار ريحي يعمل بمبدأ سافونيوس/داريوس

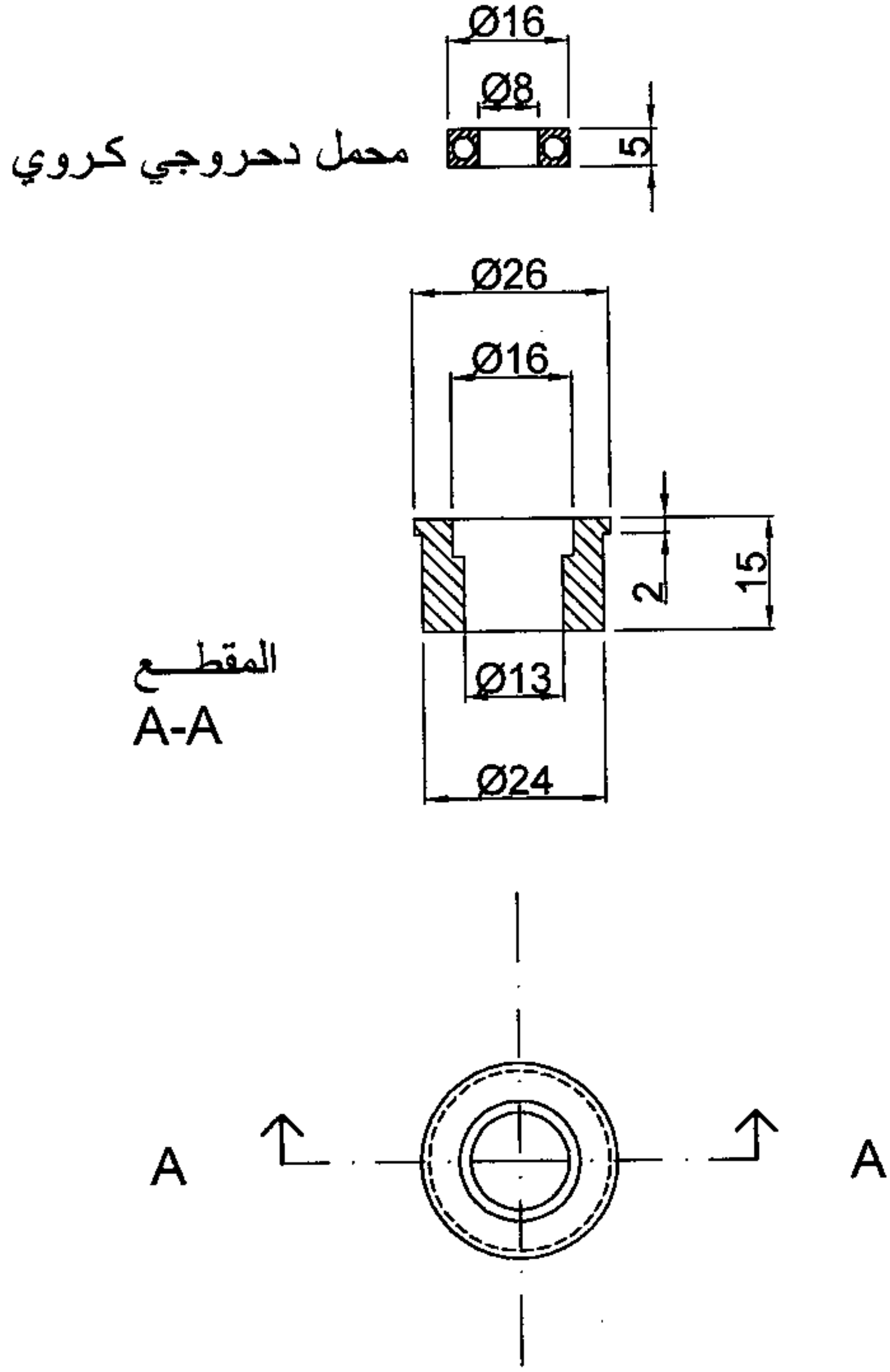


م. هاني متري	إعداد	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث
أ.د.م. نايف العبود	إشراف	

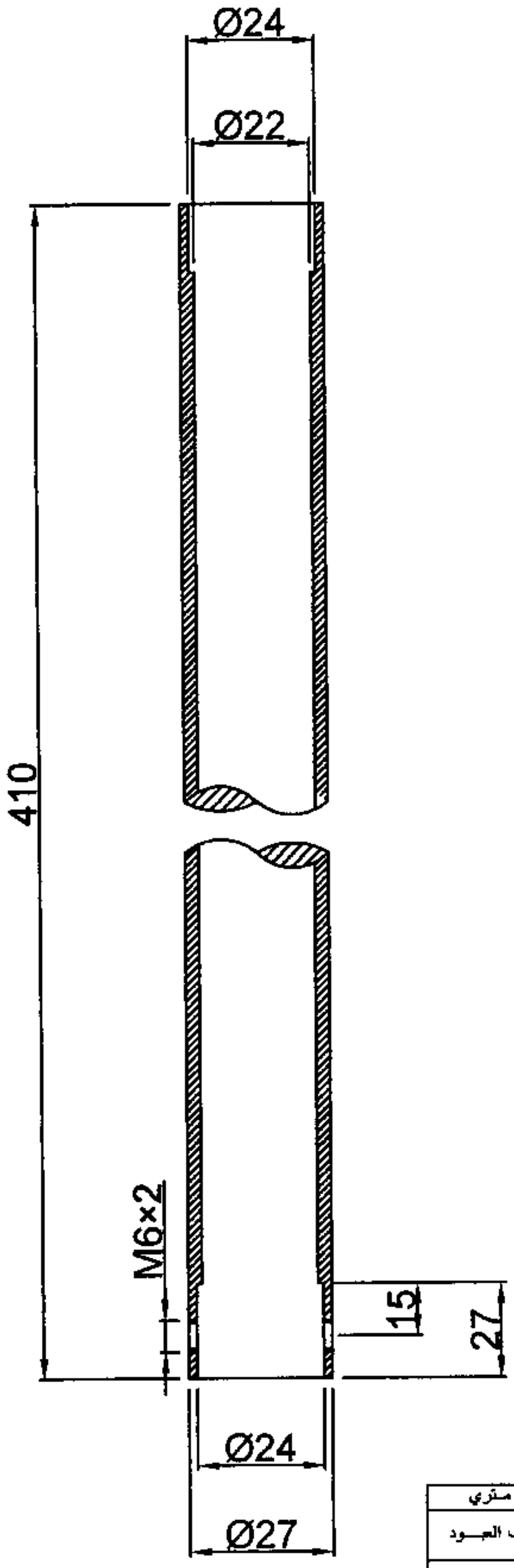
دراسة لنيل درجة الماجستير بعنوان	اسم الجزء	رقم الجزء	مالك الصنع	الأبعاد	القياس
تطوير دوار ريحي يعمل بمبدأ سافونيوس/داريوس	مسند الدوار	2	حديد	mm	1/2



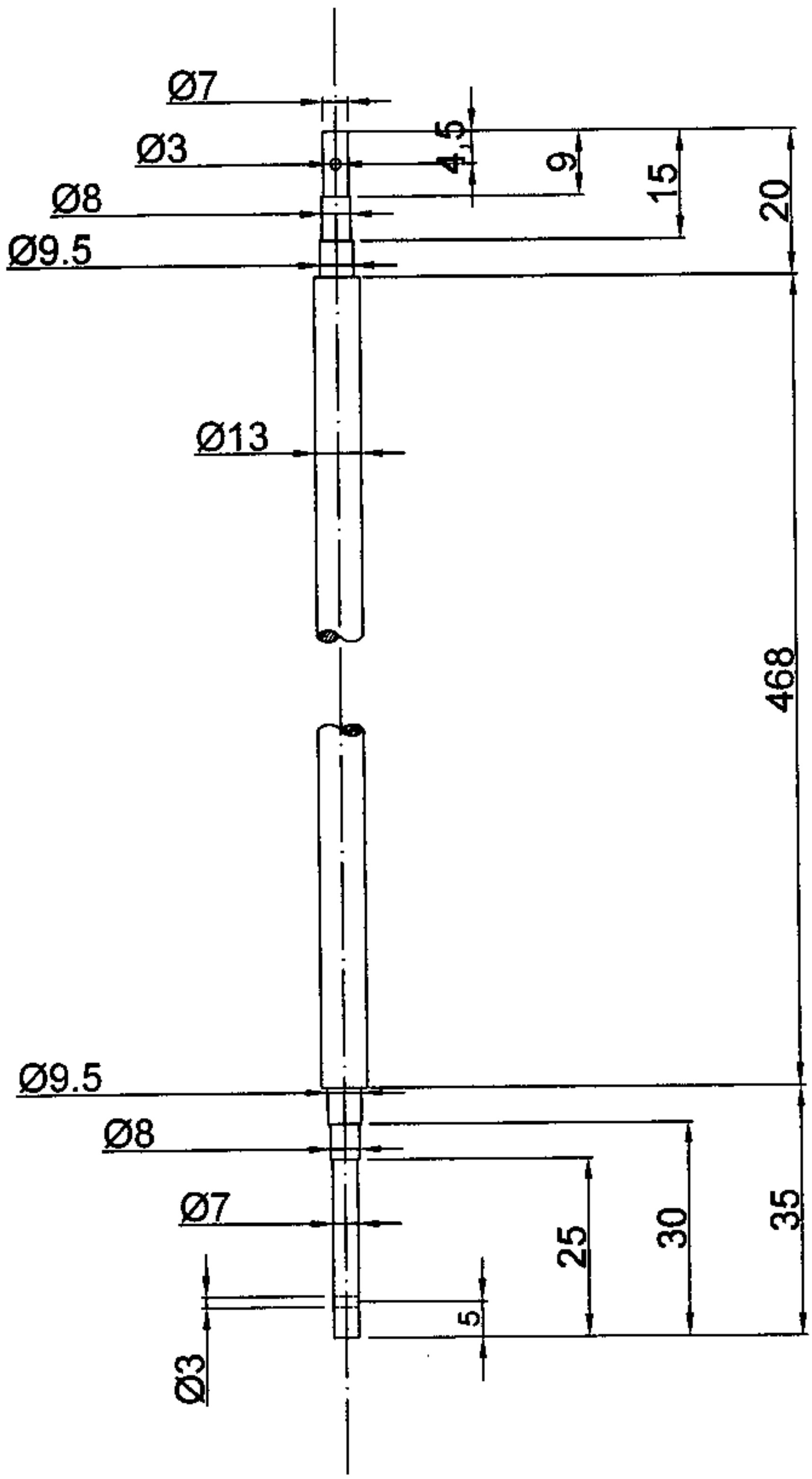
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث				إعداد	م. هاني متري
				إشراف	أ.د.م. نايف العبود
المقياس	الأبعاد	مادة الصنع	رقم الجزء	اسم الجزء	دراسة لنيل درجة الماجستير بعنوان
1/1	mm	حديد	3	حاضن المحمل السفلي	تطوير دوار ريحي يعمل بمبدأ سافونيوس/داريوس



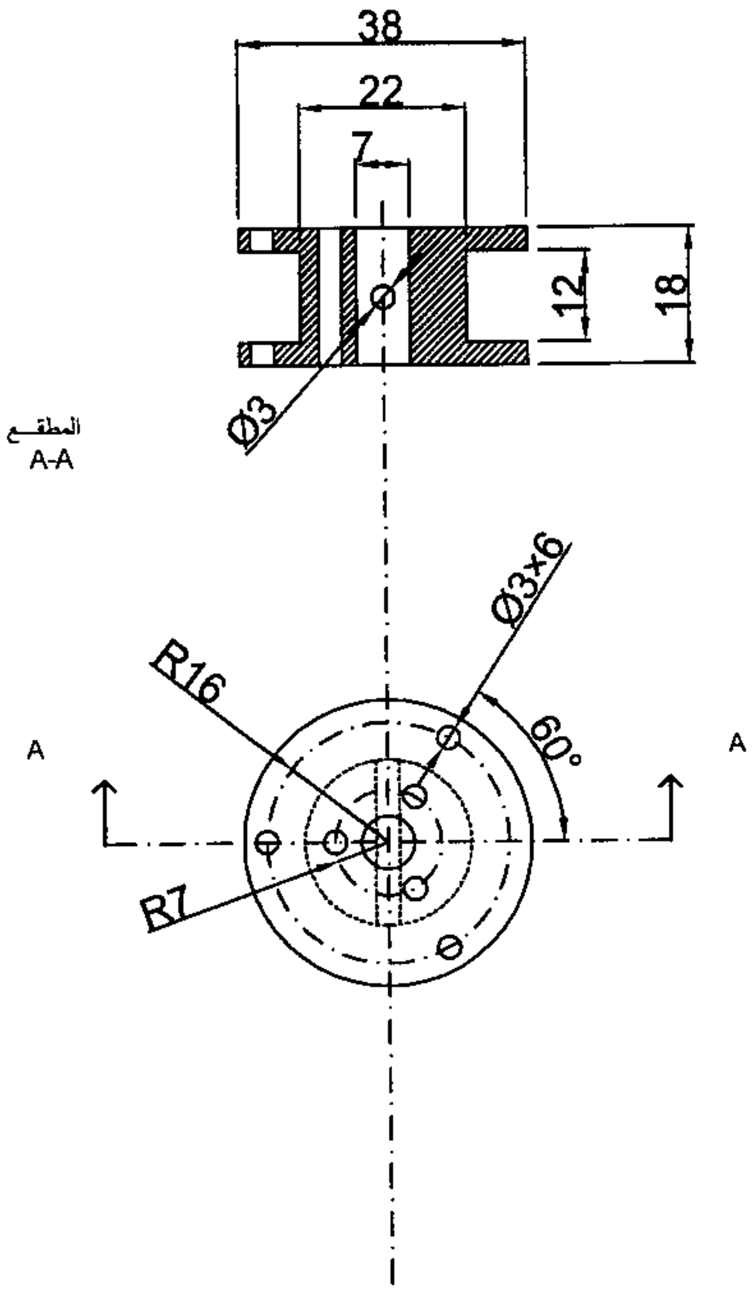
كليـــة الهندســـة الميكانيكيـــة والكهربائيـــة - جامعة البعـــث				إعداد	م. هاني ستري
				إشراف	أ.د.م. نـــايف العبـــود
المقيـــاس	الأبعـــاد	مادة الصـــنع	رقم الجزء	اسم الجزء	دراسة لنيـــل درجة الماجســـتير بعنـــوان
1/1	mm	حديـد	4	حاضـن المحمل الكـــروي	تطويـــر دوار ريحـي يعمـل بمبـــدأ ســـافونيوس/داريـوس



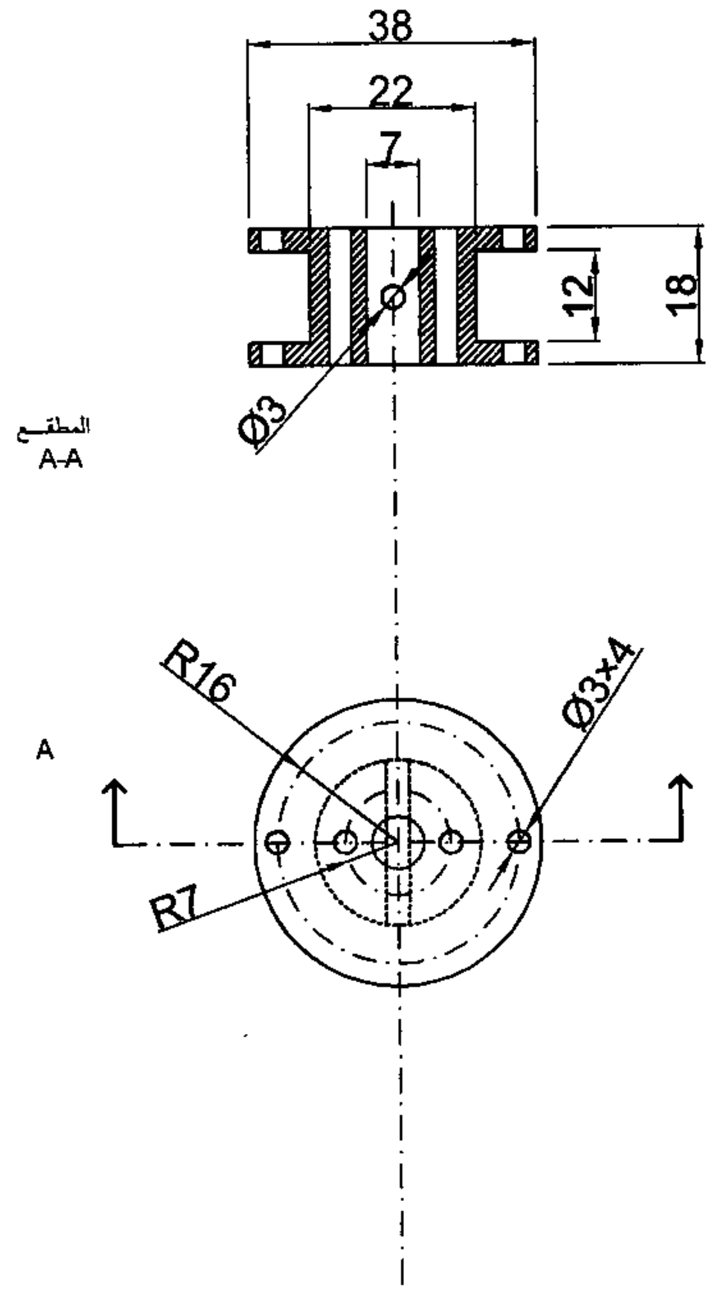
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث				إعداد	م. هاني متري
				إشراف	أ.د.م. نايف العبود
المقياس	الأبعاد	مادة الصنع	رقم الجزء	اسم الجزء	دراسة لنيل درجة الماجستير بعنوان
3/4	mm	حديد	5	حاضن محور الدوران	تطوير دوار ريحي يعمل بمبدأ سافونيوس/داريوس



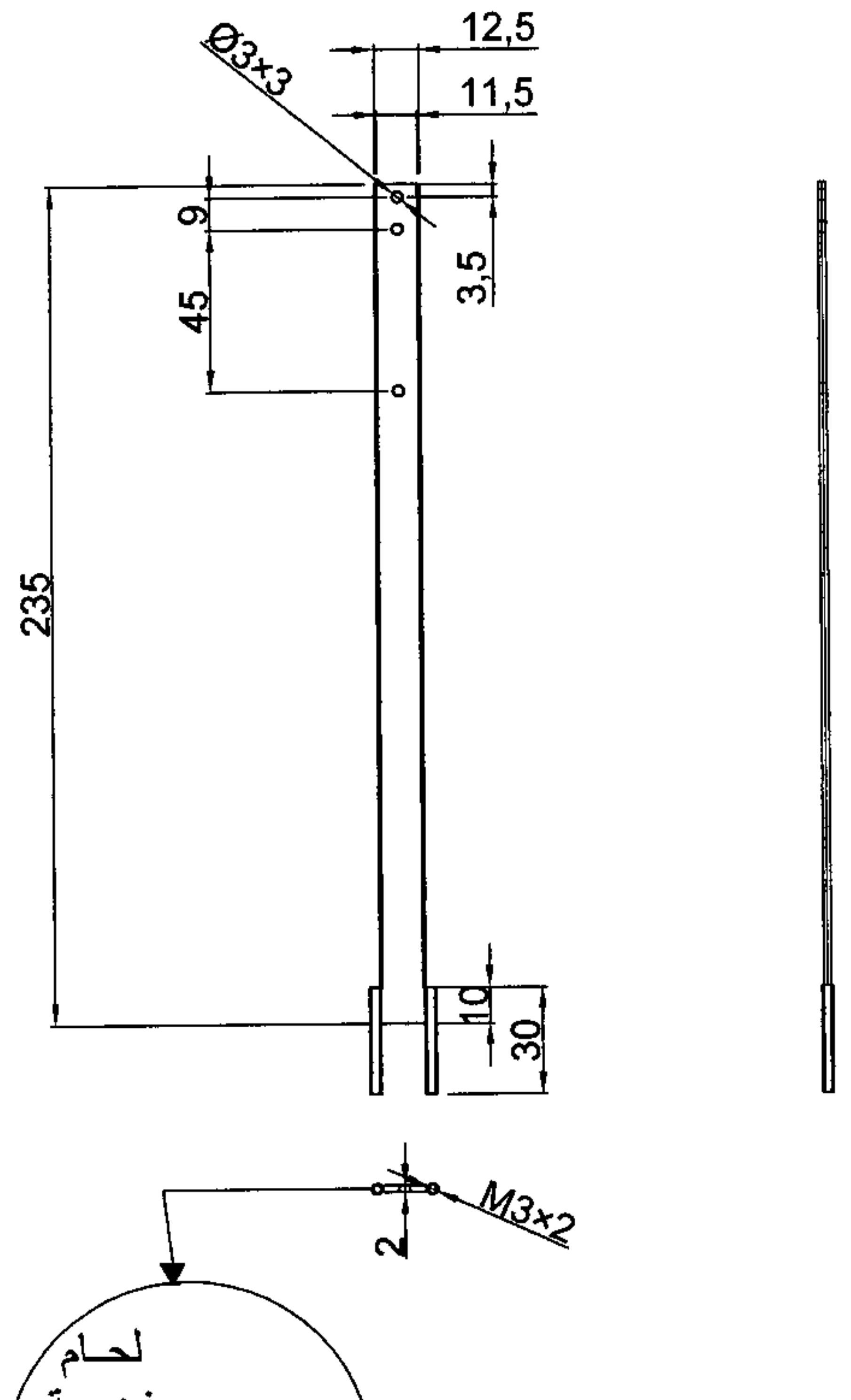
م. هاني متري	إعداد	كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث			
أ.د.م. نايف العبود	إشراف				
دراسة لنيل درجة الماجستير بعنوان	اسم الجزء	رقم الجزء	مادة الصنع	الأبعاد	المقياس
تطوير دوار ريحي يعمل بمبدأ سافونيوس/داريوس	محور الدوران	6	الألمنيوم	mm	1/2



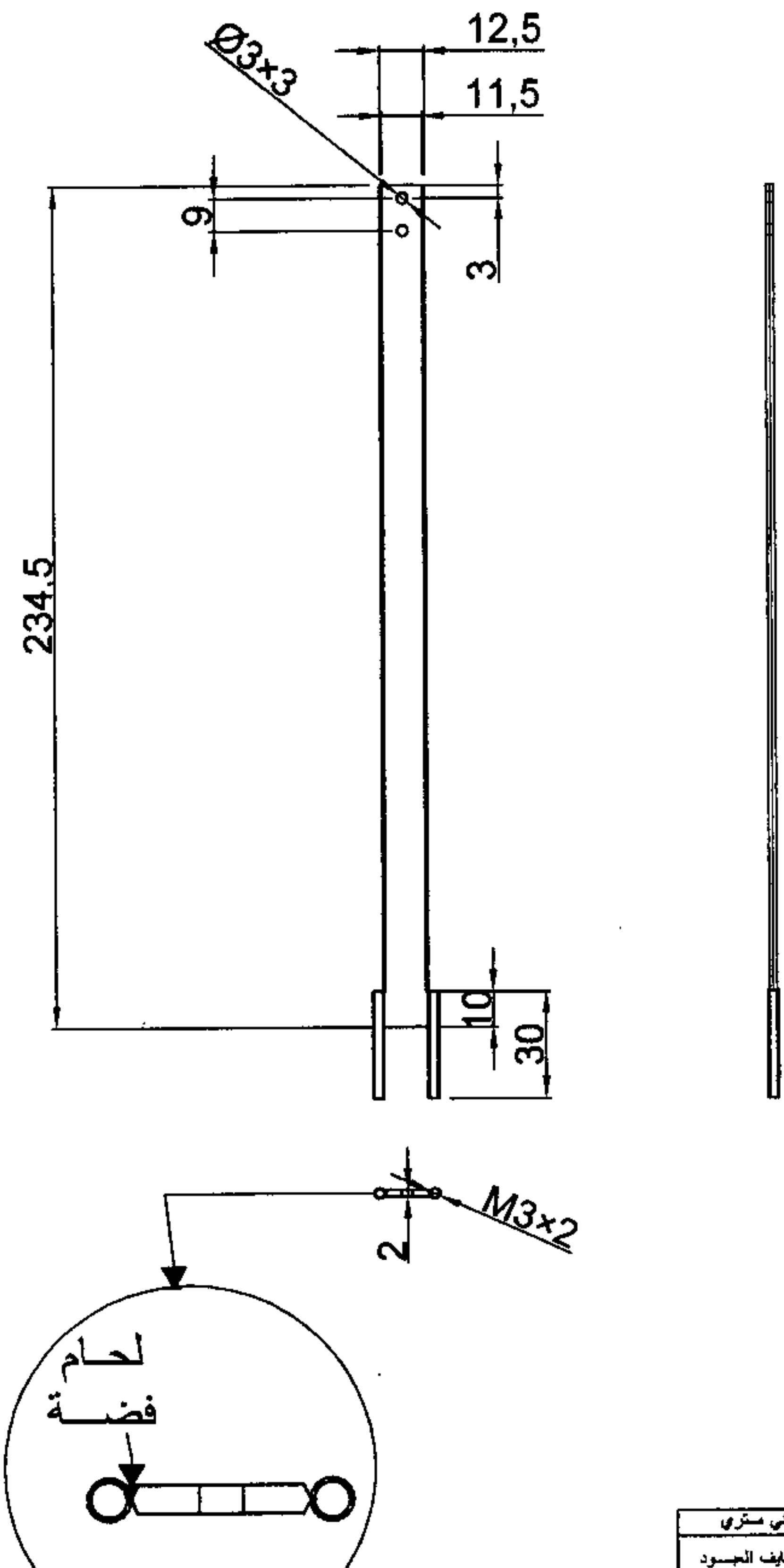
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث				إعداد	م. هاني متري
				إشراف	أ.د.م. نايف العبود
المقياس	الأبعاد	مادة الصنع	رقم الجزء	اسم الجزء	دراسة لنيل درجة الماجستير بعنوان
1/1	mm	الألمنيوم	أ/7	البكرة الثلاثية	تطوير دوار ريحي يعمل بمبدأ سافونيوس/داريوس



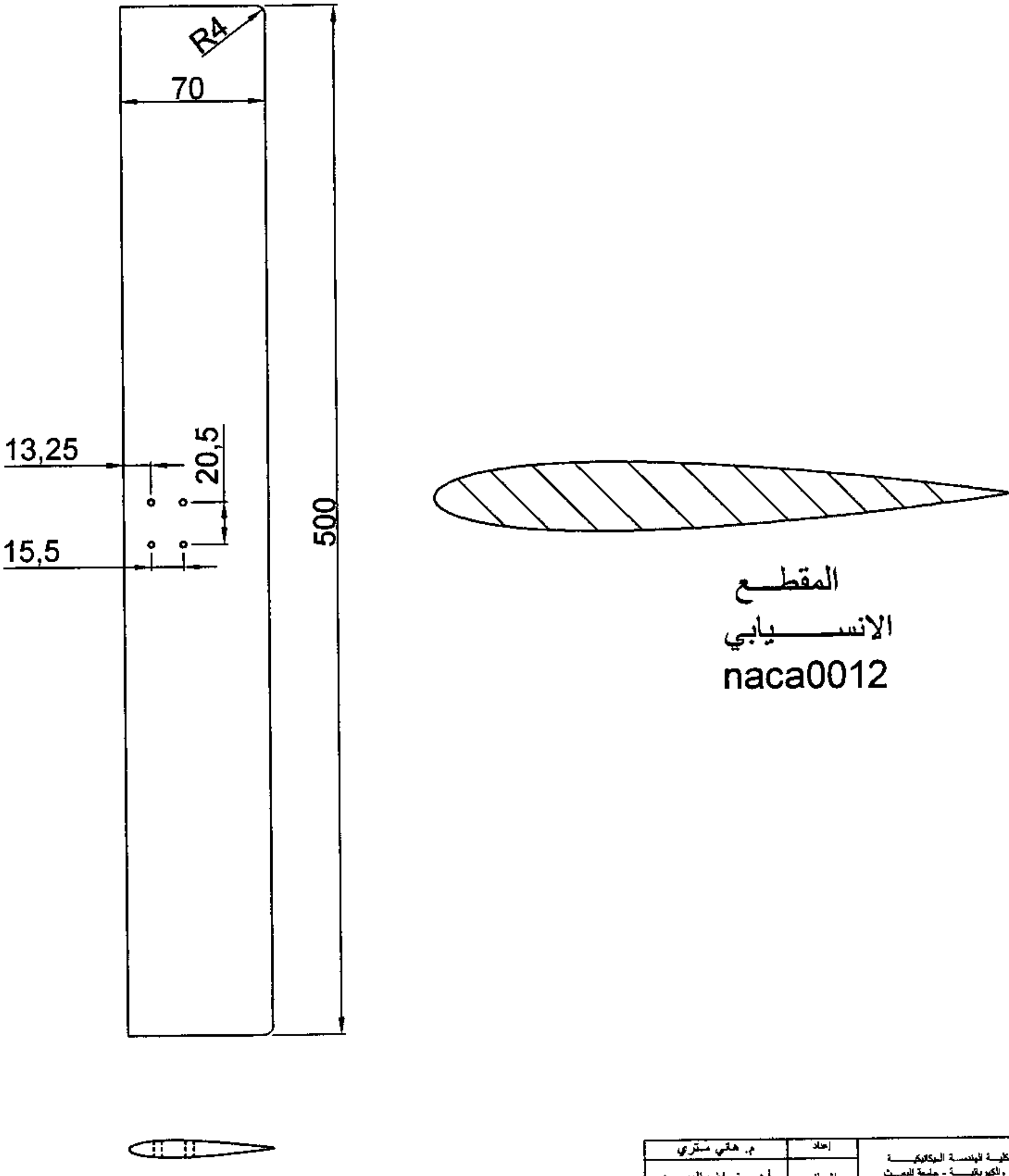
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث				إعداد	م. هاني متري
				إشراف	أ.د.م. نايف العبود
المقياس	الأبعاد	مادة التصنيع	رقم الجزء	اسم الجزء	دراسة لنيل درجة الماجستير بعنوان
1/1	mm	الألمنيوم	7/ب	المسكة الثانية	تطوير دوار ريحي يعمل بمبدأ سافونيوس/داريوس



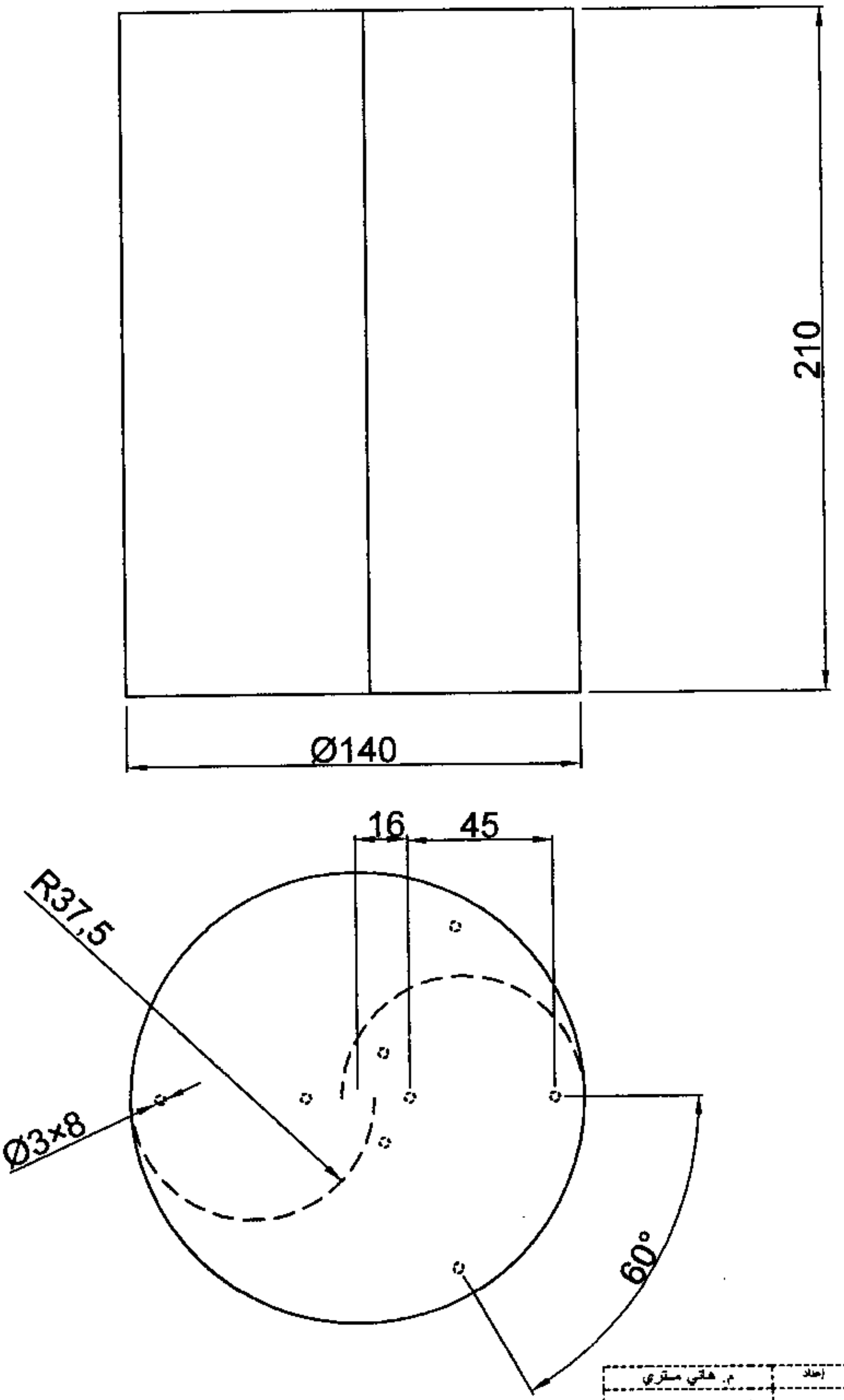
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث				إعداد	م. هاني متري
				إشراف	أ.د.م. نايف العبود
المقياس	الأبعاد	مادة الصنع	رقم الجزء	اسم الجزء	دراسة لنيل درجة الماجستير بعنوان
1/2	mm	حديد	8	ذراع التوصيل الطرية	تطوير دوار ريحي يعمل بمبدأ سافونيوس/داريوس



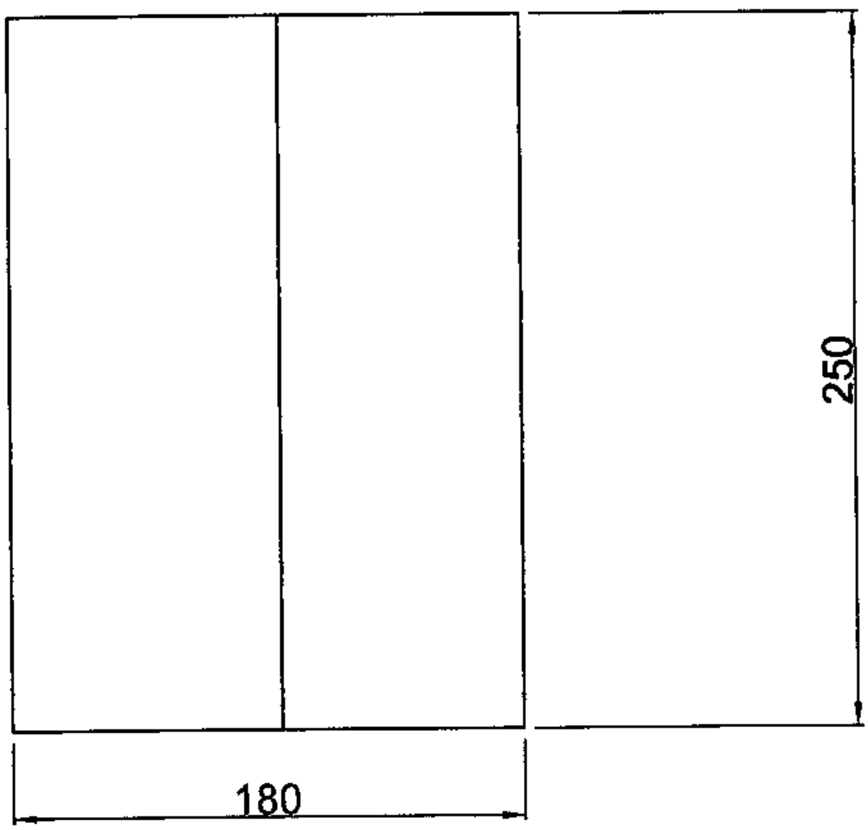
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث				إعداد	م. هاني ستري
				إشراف	أ.د.م. نايف الجسود
المقياس	الأبعاد	مادة الصنع	رقم الجزء	اسم الجزء	دراسة لنيل درجة الماجستير بعنوان
1/2	mm	حديد	9	ذراع التوصيل السفلية	تطوير دوار ريحي يعمل بمبدأ سافونيوس/داريوس

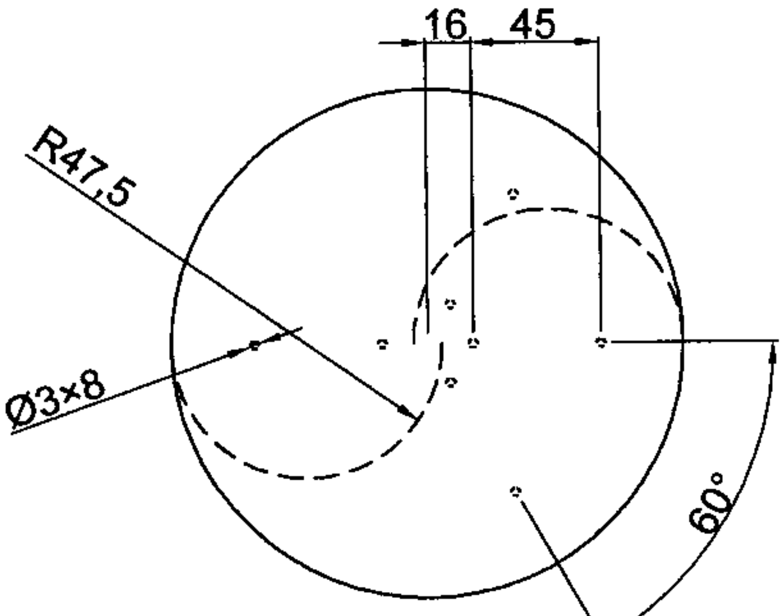


م. هاني ستري	إعداد	كليـة الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث			
أ.د.م. نايف العبود	إشراف				
دراسة لنيل درجة الماجستير بعنوان	اسم الجزء	رقم الجزء	مادة الصنع	الأبعاد	المقياس
تطويـر دوار ريحي يعمل بمبدأ سافونيوس/داريوس	المقطع الانسيابي naca0012	10	خشب السويد	mm	3/6



كليـة الهندسـة الميكانيكيـة والكهربائيـة - جامعة البعث				إعداد	م. هاني مترى
				إشراف	أ.د.م. نـايف العبـود
المقيـاس	الأبعـاد	مادة الصنع	رقم الجزء	اسم الجزء	دراسة لنيـل درجة الماجستير بعنـوان
1/2	mm	صاج - سماكة 0.2mm	I/11	دوار سافونيوس- القياس الصغير	تطويـر دوار ريحـي يعمـل بمبـدأ سافونيوس/داريـوس





كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث				إعداد	م. هاني ستري
				إشراف	أ.د.م. نايف العبود
المقياس	الأبعاد	مادة الصنع	رقم الجزء	اسم الجزء	دراسة لنيل درجة الماجستير بعنوان
3/8	mm	صاج - سماكة 0.2mm	11/ب	دوار سافونيوس- القياس الكبير	تطوير دوار ريحي يعمل بمبدأ سافونيوس/داريوس